



Kärnkraft

i dag och i morgon

EN FAKTARAPPORT INOM IVA-PROJEKTET ENERGIFRAMSYN SVERIGE I EUROPA

Innehåll

Sammanfattning.....	1	Tillgång till klyvbart material	23
Kärnkraft i 31 länder	4	Kärnvapenspridning	23
Kärnkraftens ekonomi	6	Tillgång till teknisk och industriell kompetens ...	24
Skadeståndsansvar vid olyckor	7	Reaktorteknisk utveckling	25
Användning på 10–20 års sikt	8	Bridreaktorer	25
Sverige	8	PBMR = Pebble Bed Modular Reactor	26
EU och övriga Europa	8	Fusionsreaktorer om femtio år?.....	27
Världen i övrigt	10	Hantering av använt bränsle och avfall	28
Effekter på hälsa och miljö	12	Hantering av låg- och medelaktivt driftavfall ..	28
Joniserande strålning	12	Finansiering av slutförvar	29
Kärnkraftens växthuseffekt	12	Säkerhetsanalyser	30
Effekter av driftutsläpp	13	Framtida kostnader för använt kärnbränsle och kärnavfall.....	31
Strålningspåverkan på miljön	15	Möjlig framtida teknikutveckling	32
Annan miljöpåverkan	15	Källor och referenser	34
Olycksrisker och säkerhetsarbete	18	Kommentarer	35
Reaktorsäkerhet	18	Sven Kullander	35
TMI och Tjernobyl	19	Tomas Kåberger.....	36
Hög säkerhet kräver ständigt lärande	20		
Säkerhet vid övriga anläggningar	21		
Säkerhet vid transporter	21		

Utgivare Kungliga ingenjörsvetenskapsakademien, IVA

Bearbetning Maria Holm

Grafisk form Stefan Lundström, Blue media AB

Omslagsfoto Vattenfall

Tryck Multitryck, Eskilstuna, 2002.

För tryckning och distribution ansvarar Statens energimyndighet.

Rapporterna kan beställas från Energimyndigheten, Box 310, 631 04 Eskilstuna och via hemsidan www.stem.se

Sammanfattning

Användningen av kärnkraft väcker många komplicerade frågor kring bl a ekonomi, olycksrisker samt hantering och förvaring av radioaktivt avfall. Kärnkraften har därför debatterats intensivt i Sverige liksom i många andra länder allt sedan 1970-talet. Debatten har inte sällan präglats av en förenklad och ensidig presentation av fakta, oavsett vilken åsiktsriktning som stått för inläggen. Därför har denna faktasammanställning gjorts relativt omfattande och detaljerad och sammanfattningen nedan skall främst ses som en introduktion till och ett smakprov på de frågor som diskuteras i den följande texten.

ANVÄNDNING

Kärnkraften svarar i dag för ca 45 procent av Sveriges elproduktion. Inom nuvarande EU svarar kärnkraften för ca 35 procent av elproduktionen. Av världens totala elproduktion kommer ca 17 procent från kärnkraft. Inom ramen för en allmänt effektivare energianvändning inom EU sker sedan många år en långsam ökning av elförbrukningen inom unionen.

Samtidigt räknar EU-kommissionen med att elproduktionen i kärnkraftverk inom en utvidgad union (EU30) minskar med ca 10 procent fram till 2020 och med 50 procent fram till 2030. Detta följer av nuvarande inriktning på medlemsländernas energipolitik och av att befintliga kärnkraftverk enligt kommissionens bedömning når slutet på sin livslängd.

Till detta kommer att ett stort antal fossileldade kraftverk också kommer att ha tjänat ut under samma tidsperiod. Hur dessa två trender skall hanteras blir otvivelaktigt en nyckelfråga för EU och dess medlemsländer. I USA satsar man för närvarande i första hand på förlängda drifttillstånd för befintliga reaktorer och ökad produktion i dessa. I världen i övrigt pågår en utbyggnad av kärnkraft,

främst i Kina, Japan, Indien och Korea.

EKONOMI

Produktionskostnaden för el från nya kärnkraftverk uppskattas typiskt till ca 30 öre/kWh vid en kalkylränta kring 5 procent. Fasta kapitalkostnader utgör under flera årtionden efter driftstart den dominerande delen av produktionskostnaden. Osäkerhet om hur skatter och avgifter på kärnkraft i förhållande till andra energislag kan komma att utvecklas i samma tidsperspektiv leder därför till osäkerhet om lönsamheten i att investera i ny kärnkraft på en avreglerad och konkurrensutsatt elmarknad. Produktionskostnaderna i befintliga kärnkraftreaktorer i Sverige liksom inom EU ligger typiskt i intervallet 15–25 öre/kWh. Kostnaderna varierar bl a beroende på utnyttjandegrad och aktuella kapitalkostnader, bl a för moderniseringar och renoveringar.

Alla kostnader är i princip inräknade i ovannämnda produktionskostnader för svenska kärnkraftverk, inklusive avsättningar för samtliga uppskattade framtida kostnader för att ta hand om använt kärnbränsle och annat kärnavfall samt för att riva kärnkraftreaktorerna. Reaktorinnehavarens skadeståndsansvar vid en svår reaktorolycka är dock begränsat till i dag 3,3 miljarder kr (föreslås höjt till 700 miljoner euro). Därutöver finns statliga garantier upp till i dag 6 miljarder kr (föreslås höjt till 1 500 miljoner euro).

HÄLSA OCH MILJÖ

Stråldoser från de radioaktiva utsläppen från ett kärnkraftverk under normal drift ger ett mycket litet bidrag till den individuella risken för cancer. Det årliga risktillskottet är långt under vad exempelvis dosen från kosmisk strålning under en flygresa till något av de vanliga semestermålen ger.

Andra anläggningar i kärnbränslecykeln, som dock inte finns i Sverige, kan ge högre men fortfarande små risktillskott till individer i omgivningen.

Överväganden om kärnkraftens hälso- och miljöpåverkan har därför kommit att mer fokusera dels på risken för reaktorhaverier med stora utsläpp till omgivningen, dels på säker förvaring av det mycket långlivade radioaktiva avfall som kärnkraften ger upphov till.

Om ett reaktorhaveri skulle medföra större utsläpp av radioaktiva ämnen ger detta mycket svåra följdverkningar för samhället. Antalet dödsfall som kan sättas i direkt samband med reaktorhaveriet kan begränsas genom olika beredskapsåtgärder. Men de psyko-sociala följdverkningarna kan bli mycket svåra till följd av att stora områden kan drabbas av radioaktiva markbeläggningar och kan behöva utrymmas under tidrymder som kan sträcka sig från veckor upp till något sekel. Reaktorhaveriet i Tjernobyl 1986 visade påtagligt innebörden av denna typ av följdverkningar. Å andra sidan visade reaktorhaveriet i Three Mile Island 1979 att en väl fungerande reaktorinneslutning kan förhindra större utsläpp till omgivningen även vid en hardsmälta.

Haverierna i Three Mile Island och Tjernobyl har lett till avsevärda förbättringar av reaktorsäkerheten i världen, både tekniskt och organisatoriskt. Exempelvis har de svenska reaktorerna fått ett förstärkt skydd mot utsläpp vid svåra hardsmältningar. Efter Tjernobyl har heller inget allvarligt haveri inträffat i civila kärnkraftreaktorer.

Volymen av använt kärnbränsle och annat långlivat radioaktivt avfall från de svenska kärnkraftreaktorerna beräknas totalt komma att uppgå till några tiotusental kubikmeter. Först efter några hundra tusen år har radioaktiviteten klingat av så mycket att avfallet blir, i grova drag, lika hälsofarligt som naturligt förekommande uran.

De svenska kärnkraftföretagen satsar på att förvara det använda kärnbränslet och annat långlivat avfall på 400–500 meters djup i en stabil del av det svenska urberget enligt den så kallade KBS-3-metoden.

Förvaret skall enligt gällande strålskydds-föreskrifter utformas så att årlig dos till en representativ individ i mest utsatt grupp under all framtid skall ligga under en femtionedel av den naturliga bakgrundsstrålningen.

Ett grundläggande problem i värderingen av riskerna med ett slutförvar är givetvis att bedöma trovärdigheten i de modeller som används för att beräkna inverkan av processer och fenomen i förvaret och omgivande berggrund i de mycket långa tidsperspektiv det är fråga om. Efter ingående svenska och internationella expertgranskningar har emellertid den svenska regeringen godtagit KBS-3-metoden som planeringsförutsättning för det fortsatta arbetet på ett svenskt slutförvar. Finlands regering och riksdag har gjort ett liknande ställningstagande rörande ett slutförvar för det använda bränslet från de finska kärnkraftverken.

Övrig miljöpåverkan av kärnkraft såsom markanvändning och utsläpp av miljöpåverkande gaser är låg per producerad kWh jämfört med de flesta andra energislag. Påverkan ligger på ungefär samma nivå som vindkraft, enligt olika så kallade livscykelanalyser.

Uranmineral är relativt ymnigt förekommande och har ingen annan användning än som energiråvara. Man uppskattar att man med konventionella tekniker kan hitta och utvinna uran för ungefär 250 års global förbrukning på nuvarande nivå. Man kan också använda torium som klyvbart material i nya typer av reaktorer, vilket skulle möjliggöra utnyttjande av ytterligare mycket stora reserver av klyvbart material.

KÄRNVAPENSPRIDNING

En tekniskt och ekonomiskt någorlunda utvecklad nation kan i dag ta fram egna kärnladdningar med eller utan användning av kärnreaktorer. Erfarenheterna hittills pekar mot att förhindrande av spridning av kärnladdningar i första hand är en global säkerhetspolitisk fråga, där utvecklingen av användningen av kärnkraft för fredliga ändamål torde ha liten betydelse.

TEKNISK UTVECKLING

För reaktorer som skall tas i drift inom tio år är enbart i dag färdiga reaktorkonstruktioner realistiska. Dessa konstruktioner är vidareutvecklade i förhållande till dagens reaktorer vad gäller både ekonomi och säkerhet. För nya reaktorer i Europa kommer det att ställas mycket höga krav på skyddet mot utsläpp även vid mycket svåra hårdhaveriförlopp. På längre sikt kan helt nya reaktortyper (t ex gas- eller metallsmältskylda och med nya bränslecykler) vara framtagna för kommersiellt bruk.

Forskning och utveckling pågår vidare på många håll i världen i syfte att minska mängden långlivat radioaktivt avfall från kärnkraftreaktorer. En möjlig teknik är så kallade acceleratordrivna system (ADS), som är en kombination av en partikelaccelerator, en reaktor och en uppberedningsanläggning. Förbränning (transmutation) i en ADS-anläggning skulle radikalt kunna minska mängden långlivade radioaktiva ämnen, men inte eliminera dem helt. Geologiska djupförvar kommer fortfarande att behövas men i mindre skala.

RAPPORTENS FÖRFATTARE

Denna rapport har författats av Lars Högberg och granskats och kommenterats av Sven Kullander och Tomas Kåberger. Synpunkter på rapporten har inhämtats via projektets hemsida. Författaren är ansvarig för innehållet. Ett varmt tack riktas till alla som lämnat synpunkter under arbetets gång.

Lars Högberg är ledamot av IVA avd. VII och tidigare generaldirektör för Statens kärnkraftinspektion (SKI). Han har arbetat med kärnsäkerhetsfrågor sedan mitten på 1970-talet. De senaste åren före pensioneringen var han knuten till miljödepartementet och ledde utvärderingen av kärnsäkerheten i kandidatländerna under det svenska ordförandeskapet för EU. Han har haft många internationella uppdrag inom IAEA, OECD/NEA och EU, bl a som ordförande i styrelsen för OECD/NEA.

Sven Kullander är ledamot av KVA och professor em. i högenergifysik. Han har forskat sedan början av 1960-talet vid acceleratorcentra i Chicago, Genève (CERN) och Uppsala och utvärderat acceleratorbaserad forskning i Heidelberg, Jülich, Osaka och Helsingfors. Han har intresserat sig för energifrågan bl a genom pågående projekt inom transmutationsforskningen, genom arbetet med projektet Energi, miljö, hälsa inom KVAs miljökommitte, samt som styrelseledamot i Ångström Solar Centre.

Tomas Kåberger är ledamot av IVA avd. III och främst verksam vid Göteborgs miljövetenskapliga centrum inom Chalmers och Göteborgs universitet. Han doktorerade i fysisk resursteori och har i sin forskning behandlat energisystemfrågor och gränsområdet mellan termodynamik och ekonomi. Han har också varit verksam utanför den akademiska världen som styrelseledamot i miljöorganisationer, bl a Naturskyddsföreningen, medverkat som expert eller ledamot i statliga utredningar, samt haft olika uppdrag inom energiindustrin.

Kärnkraft i 31 länder

Omkring 440 kärnkraftsreaktorer är i drift runt om i världen. De svarar i dag för cirka 17 procent av den globala elproduktionen.

140 av dessa är belägna inom EU, där deras andel av elproduktionen uppgår till cirka 35 procent, och i sju av de tolv kandidatländerna finns ytterligare 26 kärnkraftverk i drift.

Våren 2002 har Sverige elva kärnkraftreaktorer med gällande drifttillstånd. Den installerade elektriska bruttoeffekten är ca 9,8 GW.

Elproduktionen från de svenska kärnkraftverken har under åren 1991–2000 pendlat mellan 55 och 74 TWh per år. Variationerna beror på olika faktorer som styr elmarknaden, främst tillgången på vattenkraft, samt i viss mån på verkens tillgänglighet. I genomsnitt har kärnkraftverken svarat för knappt hälften av den totala svenska elproduktionen under samma period. Efter stängningen av Barsebäck 1 år 1999 uppskattas de svenska kärnkraftverken som mest producera ca 70 TWh per år.

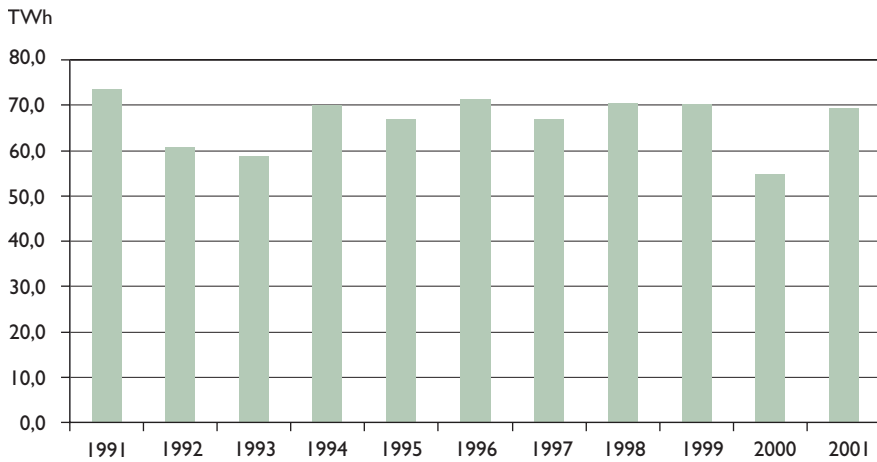
Inom EU svarade kärnkraften år 1998 för cirka 35 procent av elproduktionen. Totalt finns ca 140 kärnkraftreaktorer i drift, fördelade på åtta av medlemsländerna. Flest reaktorer och högst elproduktion från kärnkraft har Frankrike, följt av Storbritannien, Tyskland, Sverige och Spanien.

Av de tolv länder som kandiderar för medlemskap i EU har sju länder kärnkraftreaktorer i drift, nämligen Bulgarien, Litauen, Rumänien, Slovakien, Slovenien, Tjeckien och Ungern. Tillsammans har dessa länder 26 kärnkraftreaktorer (varav två i provdrift). Kärnkraftens andel av den nationella elproduktionen varierar mellan 10 och 77 procent.

Ryssland har ett 30-tal kärnkraftreaktorer i drift som svarar för ca 14 procent av landets totala elproduktion. För den europeiska delen av Ryssland är andelen avsevärt större. Ukraina har tretton kärnkraftreaktorer i drift som svarar för drygt 40 procent av landets elproduktion.

I världen som helhet fanns år 2000 438 kärnkraftreaktorer i drift. De var fördelade på 31 länder och hade en sammanlagd installerad elektrisk effekt om drygt 350 GW. Den totala elproduktionen uppgick år 1999 till ca 2 500 TWh, vilket motsvarar ca 17 procent av världens totala elproduktion. Sexton OECD-länder står för fyra femtedelar av reaktorerna och drygt 95 procent av världsproduktionen av kärnkraftsel. Bland länder utanför Europa med ett större antal kärnkraftreaktorer bör främst nämnas USA (drygt 100), Japan (drygt 50) samt Sydkorea och Kanada (ett femtontal var).

Elproduktion från kärnkraft i Sverige. Källa: STEM, SCB.



Världens kärnkraftproduktion 1999

Land	% av nationell elproduktion	Producerad el från kärnkraft TWh/år	% av världens kärnkraftproduktion	Installerad effekt GWe
USA	20	778	30,7	98
Frankrike	76	394	15,5	63
Japan	30	317	12,5	44
Tyskland	31	170	6,7	22
Ryssland	14	122	4,8	20
Korea	39	103	4,1	13
Storbritannien	26	96	3,8	13
Sverige	47	73	2,9	9
Kanada	13	73	2,9	15
Ukraina	42	72	2,8	12
Övriga världen	9*	340	13,4	48
VÄRLDEN	17	2538	100,0	357

* Endast länder med kärnkraft

Källa: IEA Key World Energy Statistics 2001.

Kärnkraftens ekonomi

Kostnaderna för att producera kärnkraftsel är mycket okänsliga för priset på uran.

I stället är kapitalkostnaderna dominerande. För el från nya kärnkraftsverk uppskattas produktionskostnaderna till cirka 30 öre/kWh vid en kalkylränta kring 5 procent. För befintliga verk är kostnaderna lägre.

Olika energislags ekonomi och konkurrenskraft på marknaden påverkas i hög grad av vilka skatter, avgifter och subventioner som är knutna till respektive energislag till följd av nationella politiska beslut. I det följande behandlas bara de kostnader som är direkt förknippade med produktion av el i kärnkraftverk, dvs kostnader för byggande, drift, underhåll, avfallshantering och rivning.

Bränslekostnaderna utgör en liten del av de totala kostnaderna per kWh kärnkraftsel. Typiskt uppgår de i Sverige till 4–5 öre per kWh, inräknat avsättningar om 1–2 öre per kWh för framtida kostnader för att ta hand om använt kärnbränsle och kärnavfall samt för att riva reaktorerna.

Övriga löpande drift- och underhållskostnader uppgår typiskt till 5–10 öre per kWh (inklusive avgifter för att täcka kostnaderna för myndighetstillsyn samt vissa beredskapsåtgärder). Variationen beror mycket på verkens storlek och utnyttjandegrad, detta eftersom en stor del är fasta årliga kostnader som är relativt oberoende av reaktorstorlek. För att få ned underhålls- och reparationskostnader kan verken välja att investera i större ombyggnader och moderniseringar, som då slår igenom på kapitalkostnaderna.

Kapitalkostnaderna utgör normalt den dominerande delen av kärnkraftverkens kostnader under de första 20–25 åren av drift, dvs innan de stora byggnadskostnaderna har tjänats in. För nya

kärnkraftverk i OECD-länderna räknar man för närvarande typiskt med byggnadskostnader kring 20 000–25 000 kr per installerad kW elektrisk effekt, även om reaktorleverantörerna strävar efter att kunna pressa dessa kostnader med 20–25 procent genom förbättrade, standardiserade konstruktioner och korta byggtider.

Det innebär att en ny kärnkraftreaktor om 1 GW installerad elektrisk effekt skulle kräva en investering av cirka 20 miljarder kr, vilket i sin tur skulle medföra att kapitalkostnaderna för ny kärnkraft kommer att ligga i intervallet 20–40 öre per kWh (med normala amorteringstider för lånen och en utnyttjandetid på 5 000–6 000 timmar per år). Därmed uppskattas produktionskostnaderna för el från nya kärnkraftverk uppgå till 30–60 öre per kWh.

Variationen beror främst på vilken kalkylränta som används. Den lägre siffran gäller en kalkylränta kring 5 procent, dvs nära räntenivån på långfristiga obligationslån. Den högre siffran gäller en kalkylränta på 10 procent. Vilken kalkylränta som är mest »rimlig« beror i hög grad på den bedömda marknadsutvecklingen, inklusive skatter och avgifter, i den aktuella situationen.

Kostnadsuppskattningarna avser reaktorer som bygger på dagens reaktortyper med viss vidareutveckling.

För äldre kärnkraftverk blir kapitalkostnaderna lägre i och med att kostnaderna för uppförandet tjänats in. Både reaktortillverkare och kraftföretag anser det möjligt att uppnå en teknisk och ekonomisk livslängd på 40–60 år för flertalet reaktorer, förutsatt en konkurrensneutral energibesättning.

Sådana livslängder kräver normalt ersättningsinvesteringar på en eller ett par miljarder kronor per tjuugoårsperiod av fortsatt drift, detta för att ersätta komponenter som förslitits eller blivit

tekniskt omoderna så att det exempelvis blir svårt att få tag i reservdelar. Höjda säkerhetskrav kan också kräva investeringar.

De elva svenska kärnkraftreaktorerna i drift befinner sig i eller på väg in i denna fas, med typiska kapitalkostnader i området 4–10 öre per kWh men med stora individuella variationer.

Deras elproduktionskostnader ligger i intervallet 15–20 öre per kWh; i något eller några fall upp mot 25 öre/kWh. Kostnaderna varierar bl a beroende på utnyttjandegrad och aktuella kapitalkostnader, bl a för moderniseringar och renoveringar, och kostnaderna kan förväntas ligga i huvudsak inom detta intervall åtminstone de närmaste tio åren såvida inga större oförutsedda händelser inträffar.

De internationella konventioner, som Sverige tillträtt, innebär att staten står för vissa begränsade garantier om skadestånden vid en eventuell stor kärnkraftolycka skulle överstiga de belopp reaktorägaren är skyldig att teckna försäkringar för. I övrigt är i princip alla kostnader inräknade i ovannämnda produktionskostnader för svenska kärnkraftverk. Sålunda inkluderas avsättningar för samtliga framtida kostnader för att ta om hand använt kärnbränsle och annat kärnavfall samt för att riva kärnkraftreaktorerna i enlighet med de krav som ställs i svensk lagstiftning.

I EU-länder med kärnkraft är kostnadsbilden likartad inom de intervall som anges ovan men med stora variationer mellan olika verk. Exempelvis uppvisar ett par av de finska reaktorerna produktionskostnader kring 12–13 öre/KWh.

Skadeståndsansvar vid olyckor

I Sverige liksom i huvuddelen av OECD-länderna regleras vissa minimivåer på skadeståndsansvar i form av försäkringsbelopp för företagen i kombination med statliga tilläggsgarantier genom de s k Paris- och Brysselkonventionerna.

Det finns inga hinder för konventionsstaterna att ställa nationella krav över minimivåerna.

Sverige tillhör de länder som ligger i topp bland världens kärnkraftländer när det gäller ekonomiskt ansvar för skador som kan inträffa till följd av atomolyckor.

I Sverige gäller sedan 2001 följande ansvarsintervall:

- Anläggningsinnehavaren: upp till 3,3 miljarder kr
- Brysselkonventionens stater gemensamt: intervallet 3,3–4,7 miljarder kr
- Svenska staten: resterande upp till 6 miljarder kr

En principöverenskommelse har nyligen nåtts mellan konventionsstaterna om en kraftig höjning av skadeståndsbeloppen upp till maximalt 1,5 miljarder euro enligt följande:

- Anläggningsinnehavaren: upp till 700 miljoner euro
- Svenska staten (för svenska anläggningar): intervallet 700–1 200 miljoner euro
- Brysselkonventionens stater gemensamt: resterande upp till 1 500 miljoner euro.

Nu återstår ratificering med tillhörande översyn av nationella lagar innan överenskommelsen blir bindande.

För bränslefabriker och andra anläggningar som enbart hanterar oenstrålat uran gäller lägre belopp, i Sverige f n ca 110 miljoner kr.

De nämnda taken på skadeståndsbeloppen skulle kunna innebära att alla drabbade inte får ut full ersättning vid mycket stora olyckor. Kostnaderna för utökade försäkringar och garantiåtaganden har marginell inverkan på kostnaden per producerad kWh.

Några länder har i princip »obegränsat skadeståndsansvar«, men i praktiken finns det även i dessa länder gränser för vad som rimligen går att kräva i form av försäkringar och olika garantiåtaganden. I USA sträcker sig exempelvis industrins ansvar upp till sammanlagt 9,7 miljarder dollar genom försäkringar och gemensamma garantiåtaganden.

Källa: SKI Nucleus 1/2001, OECD/NEA.

Användning på 10–20 års sikt

I dag sker utbyggnad av kärnkraft främst i Ryssland, Kina, Japan, Indien och Korea. I USA förlängs drifttillstånden medan ett antal västeuropeiska länder inriktar sig på avveckling.

För världen som helhet tror de flesta bedömare på en i stort sett oförändrad produktionsnivå fram till 2010. Den närmaste tiden därefter bedöms kärnkraften minska, men på längre sikt är användningen mycket svår att förutsäga.

SVERIGE

Alltsedan folkomröstningen 1980 har riksdagens energipolitiska beslut inriktats på att svensk kärnkraft skall avvecklas i den takt som är möjlig med hänsyn till behovet av elektrisk kraft för upprätthållande av sysselsättning och välfärd. Förbud mot att ge tillstånd till att bygga nya kärnkraftreaktorer är inskrivet i lagen om kärnteknisk verksamhet. Därmed är projektering och byggande av nya kärnkraftverk i dag inte aktuellt i Sverige och skulle kräva genomgripande förändring av både lagstiftning och energipolitik.

Avvecklingen av svensk kärnkraft inleddes med att Barsebäck 1 stängdes i slutet av 1999 efter regeringsbeslut med stöd av avvecklingslagen och ingående rättslig prövning av regeringsrätten. Regeringen har i prop. 2001/02:143 bedömt att en stängning av Barsebäck 2 bör kunna genomföras senast under 2003.

Vad gäller avvecklingen av övriga reaktorer anser regeringen enligt prop. 2001/02:143 att möjligheten att träffa ett avtal liknande det tyska bör prövas även i Sverige. I juni 2000 träffades i Tyskland ett avtal mellan regeringen och kraftindustrin beträffande stängningen av de tyska kärnkraftverken. Genom avtalet fastställs en total elproduktionsram i form av en maximal energimängd som kan produceras i de befintliga reaktorerna. När den avtalade totala produktionsvolymen är uppnådd skall samtliga reaktorer vara ut-

fasade. Hur den totala volymen fördelas på olika reaktorer får kraftindustrin bestämma.

Produktionskostnaderna för svensk kärnkraft kommer under de närmaste 10–20 åren sannolikt att ligga kvar i intervallet 15–25 öre per kWh, inräknat kapitalkostnader för större renoveringar och moderniseringar för i första hand upp till ca 40 års drift av de befintliga reaktorerna. I USA visar de ansökningar, som tillsynsmyndigheten där har beviljat, att drifttiden tekniskt sett kan förlängas upp till ca 60 år. Renoveringen av Oskarshamn 1 har också visat att omfattande ombyggnader och kontroller, också inne i själva reaktortanken, är tekniskt och strålskyddsmässigt möjliga att genomföra.

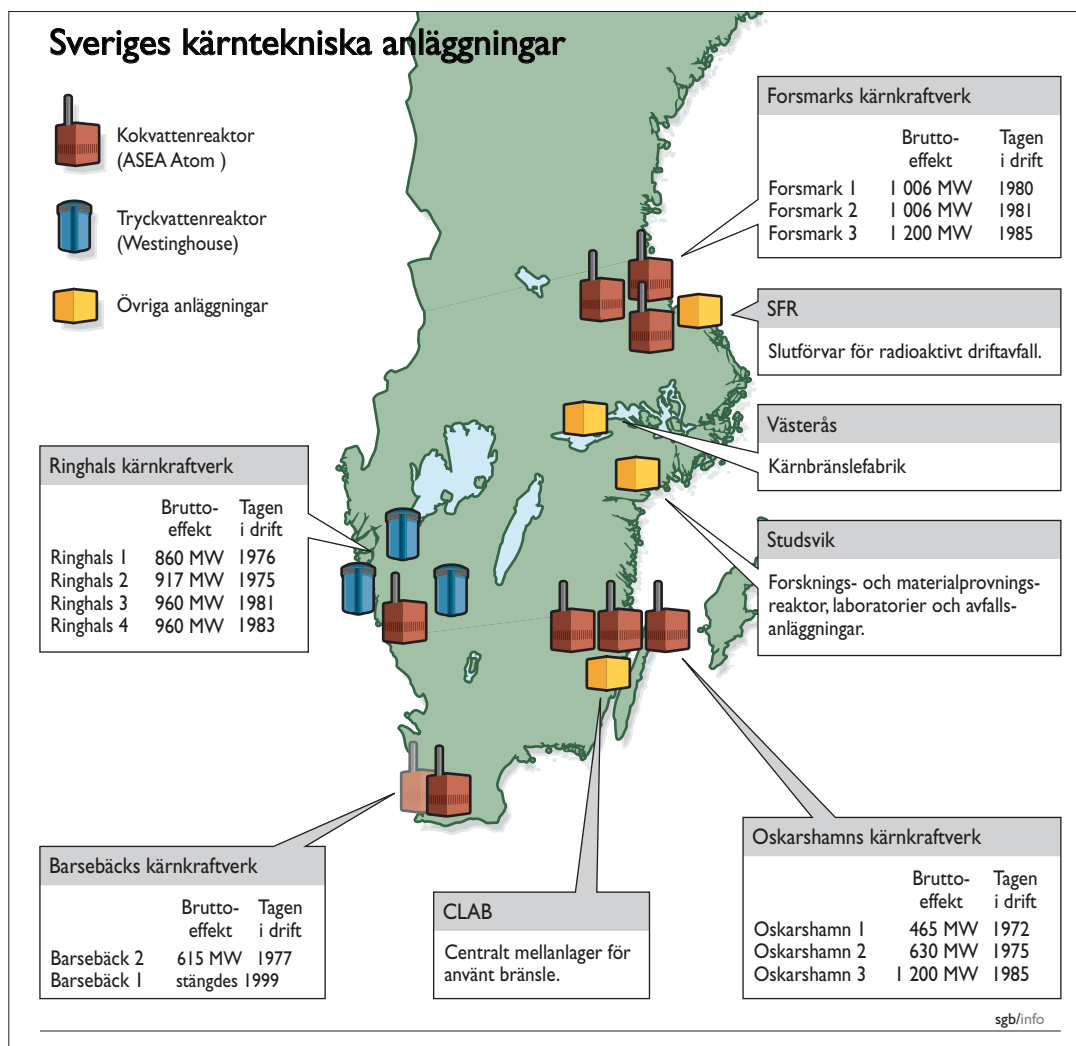
Den ekonomiska konkurrenskraften för svensk kärnkraftsel på den nordeuropeiska marknaden kan under perioden huvudsakligen komma att bestämmas av två faktorer:

- prisutvecklingen på fossila bränslen, främst naturgas,
- utvecklingen av olika politiska styrmedel, som energiskatter och miljöavgifter, både inom och utom Sverige.

EU OCH ÖVRIGA EUROPA

Elförbrukning och ekonomisk utveckling visar starka samband enligt historiska data. Sålunda har elförbrukningen inom EU de senaste femton åren ökat med runt 2 procent per år. Även om energianvändningen har blivit effektivare på många områden under samma period torde det krävas mycket starka styrmedel för att bryta ökningen i elanvändningen – långt starkare än som hittills visat sig politiskt möjligt.

Om ökningen av elanvändningen fortsätter räknar EU-kommissionen med att nya kraftverk



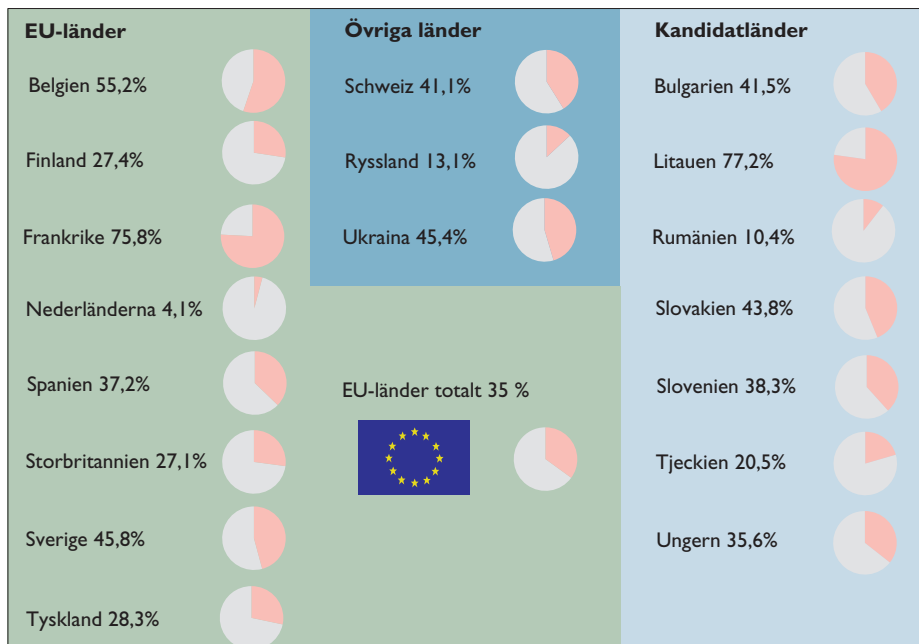
med en sammanlagd installerad elektrisk effekt om ca 500–600 GW behöver byggas de närmaste tjugo åren, dels för att ersätta uttjänta verk, dels för att möta ökad efterfrågan på el.

Samtidigt uppskattar kommissionen att produktionen av kärnkraftsel inom en utvidgad union (EU30) minskar med 10 procent fram till 2020 och med 50 procent fram till 2030. Detta som en följd av medlemsländernas nuvarande energipolitik i kombination med att befintliga kärnkraftverk når slutet på sin livslängd.

På kort sikt har bl a utvecklingen mot en konkurrensutsatt och internationaliserad elmarknad lett

till ett visst överskott på produktionskapacitet inom Europa. Likväl påpekar EU-kommissionen i sin grönbok att ett flertal EU-länder under den närmaste tioårsperioden måste komma fram till en strategi för hur elförsörjning och elanvändning skall ordnas för de därpå kommande 30 till 50 åren för att nå både ekonomiska och miljömässiga mål.

Endast i ett fåtal västeuropeiska länder, däribland Finland och Frankrike, finns det i dag ett uttalat stöd på regeringsnivå för fortsatt användning av kärnkraft inklusive byggande av nya reaktorer vid behov. I många västeuropeiska länder är den ener-



Kärnkraftens andel av elproduktionen i olika europeiska länder.

gipolitiska inriktningen att avstå från användning av kärnkraft, åtminstone på längre sikt. I Tyskland, Belgien och Holland har regeringarna tagit initiativ för att begränsa återstående drifttid hos befintliga reaktorer.

I dagens marknadsläge föredrar privata kraftföretag ofta investeringar som kan tas i mindre steg och med kort byggnads- och avskrivningstid, såsom t ex gaskombianläggningar vid redan existerande gasnät.

I flera länder finns en betydande osäkerhet om när man kan få fungerande och politiskt accepterade system i drift för att ta om hand och långsiktigt förvara använt kärnbränsle och kärnavfall.

Dessa osäkerheter om framtida marknadsutveckling och framtida kostnader, liksom om framtida skatter och avgifter på olika energislag, leder till höga kalkylräntor inför investeringsbeslut på marknadsmässiga villkor. Detta slår extra hårt mot kärnkraften eftersom dess kapitalkostnader dominerar dess totala kostnader. Samtidigt kan andra typer av strategiska överväganden, där bl a försörjningstrygghet tillmäts stor betydelse, leda till andra slutsatser vilket det finska beslutet om utbyggnad av kärnkraften visar.

I Europa utanför EU satsar, enligt redovisningar vid IAEAs generalkonferenser, framförallt Ryssland på fortsatt användning av kärnkraft i stor skala. Närmast gäller det att ge befintliga reaktorer så lång livslängd som möjligt samt att bygga färdigt tidigare påbörjade anläggningar.

Det är i dag svårt att säga när man kommer att fortsätta en utbyggnad av kärnkraft i större skala. Under den närmaste tioårsperioden kan det i första hand bli fråga om 1000 MWe tryckvattenreaktorer av modern rysk standardkonstruktion (VVER-1000). Samtidigt satsar man på utveckling av nya reaktortyper.

Även Ukraina försöker ge befintliga reaktorer så lång livslängd som möjligt. Samtidigt färdigställs några påbörjade reaktorer av typ VVER-1000, bl a för att kompensera bortfallet av elkraft från Tjernobyl där nu samtliga reaktorer stängts av.

VÄRLDEN I ÖVRIGT

I USA satsar den nuvarande regeringen på en utbudsorienterad energipolitik i syfte att främja fortsatt tillväxt av ekonomi och levnadsstandard. Det gör att man ser om sitt hus när det gäller elproduktion, både för baslast- och toppkraftbehov.

På kärnkraftområdet satsar industrin i första hand på förlängning av drifttillstånden för befintliga reaktorer från ursprungliga 40 år till 60 år. Närmare tjugo ansökningar om förlängningar hade vid utgången av 2001 lämnats in till USA:s kärnkraftsinspektion (USNRC), varav åtskilliga nu har beviljats. Ytterligare ett tjugotal ansökningar väntas de närmaste åren.

Industrin har vidare genom olika förbättringar ökat produktionen i befintliga reaktorer. Tidigare avställda reaktorer tas också åter i drift. Huruvida nya reaktorer kommer att beställas torde i hög grad bero på marknadens utveckling. Betydelsefullt blir troligen också att det sedan länge planerade och mycket omdiskuterade federala förvaret för använt kärnbränsle i Yucca Mountain nu ser ut att komma till stånd sedan kongressen och presidenten sommaren 2002 fattat de avgörande besluten.

Om nya reaktorer skulle beställas de närmaste åren kommer det troligen i första hand röra sig om vidareutvecklingar av befintliga och beprövade typer av lättvattenreaktorer. Flera sådana reaktorkonstruktioner har redan typgodkänts av USNRC, vilket förväntas leda till kortare ledtider för nybyggnation. Amerikanska företag deltar därutöver aktivt i utvecklingen av nya typer av gaskylda reaktorer.

I världen i övrigt pågår en utbyggnad av kärnkraft främst i Kina, Japan, Indien och Korea. Sammanlagt rör det sig om ett trettio-tal reaktorer som planeras kunna tas i drift under det närmaste decenniet.

Stora skillnader mellan förhållandena i olika länder gör att utvecklingen på längre sikt vad gäller användningen av kärnkraft i olika delar av världen blir mycket svår att förutsäga. För världen som helhet pekar de flesta bedömningarna av internationella expertorgan på att den sammanlagda kärnkraftproduktionen kommer att ligga på

Påverkande faktorer för kärnkraftens framtid

Många faktorer påverkar den framtida användningen av kärnkraft i olika delar av världen. Till de viktigaste hör:

- Utveckling av efterfrågan på el och tillgång på produktionskapacitet på aktuella marknader.
- Utveckling av tillgång och priser på olika energiråvaror liksom på tekniker för elproduktion, särskilt då från förnyelsebara energikällor.
- Typ av elmarknad: fri konkurrens mellan olika producenter eller huvudsakligen statligt styrd och ägd produktion.
- Utveckling vad gäller politiskt beslutade styrmedel i form av skatter, avgifter och subventioner syftande till att uppnå olika energi- och miljöpolitiska mål.
- Internationella krav på ytterligare begränsningar av utsläpp av koldioxid och andra klimatpåverkande gaser. EU och ett antal industriländer i övriga delar av världen har dock deklarerat att de avstår från att använda utsläppsminskningar genererade av kärnkraftanläggningar för att uppfylla sina åtaganden enligt Artikel 3:1 i Kyotoprotokollet.
- Utveckling vad gäller politisk och social acceptans eller åtminstone tolerans vad gäller vissa typer av risker förknippade med kärnkraft, främst risker förknippade med svåra reaktorhaverier och hantering och slutlig förvaring av använt kärnbränsle och högaktivt, långlivat kärnavfall. Den fortsatta utvecklingen av kunskapen om hälsoeffekter vid låga stråldoser kan också påverka riskbedömningarna. Frånvaro av svåra reaktorhaverier, samt förverkligande av nationellt och lokalt accepterade slutförvar torde ha stor betydelse för såväl allmänhetens som politikernas och finansmarknadernas inställning till framtida användning av kärnkraft.

i stort sett oförändrad nivå fram till 2010 för att sedan minska både i absoluta tal och som relativ andel av världens elproduktion.

Bortom 2020 delar sig expertbedömningarna mer påtagligt. Några tror på en renässans för kärnkraft som följd av utveckling av ny teknik, höjda priser på fossila bränslen (särskilt olja och gas) samt allt hårdare internationella krav på minskade utsläpp av växthusgaserna. Andra experter tror på en fortsatt minskning av kärnkraftens roll i världens elförsörjning som följd av tekniska och kommersiella genombrott för nya energisystem som är mindre politiskt kontroversiella än kärnkraft och som huvudsakligen bygger på förnyelsebara energikällor.

Effekter på hälsa och miljö

Uppkomsten av radioaktiva ämnen är en ofrånkomlig följd av de kärnklyvningar som är grunden för ett kärnkraftverks elproduktion. Människor och miljö måste skyddas mot skadliga effekter av den strålning de radioaktiva ämnena sänder ut ända tills de sönderfallit till stabila, ofarliga ämnen.

Vid diskussioner av kärnkraftens effekter på hälsa och miljö fokuseras intresset oftast på den joniserande strålning som de radioaktiva ämnena utsänder. En fullständig miljöanalys måste ta med alla led i kärnbränslecykeln, från urangruvan till slutförvaret. Analysen måste också omfatta t ex de utsläpp av koldioxid och andra ämnen som uppstår vid produktion av den el som går åt vid framställningen av kärnbränsle samt vid transporter. Dessa behandlas kortfattat nedan.

JONISERANDE STRÅLNING

Kärnbränslet i reaktorhärden sänder ut en mycket intensiv joniserande strålning. Även de komponenter, som befinner sig i eller nära reaktorhärden, utsätts för en så intensiv neutronbestrålning att radioaktiva ämnen alstras även i dem.

Kärnkraftens växthuseffekt

Även elproduktion med kärnkraftreaktorer ger upphov till vissa utsläpp av växthusgaser, främst koldioxid, samt försurande gaser som svaveldioxid och kväveoxider.

Utsläppen av växthusgaser och försurande gaser kommer till övervägande del från gruvdriften och anrikningen av uran-235 och är starkt beroende av i vilken utsträckning fossila bränslen används för att producera den el som behövs i processerna. För kärnkraftverken i Forsmark och Ringhals har Vattenfall uppskattat koldioxidutsläppen till ca 2,6–2,8 g per producerad kWh, medan utsläppen av svaveldioxid och kväveoxider ligger vardera kring 0,01 g per producerad kWh.

Enligt Vattenfalls livscykelanalyser för Forsmark och Ringhals ligger utsläppen av växthusgaser och försurande gaser per producerad kWh från kärnkraft på samma nivå som från vindkraft. Liknande resultat har framkommit i ett stort europeiskt projekt, ExternE, där elproduktionens effekter på miljö och hälsa har beräknats med hjälp av livscykelanalyser.

För att skydda människor och miljö från strålningen måste således de radioaktiva ämnen som bildas i reaktor hållas inneslutna i så stor utsträckning som rimligen är möjligt ända tills de sönderfallit och den joniserande strålningen upphört. De radioaktiva ämnen som bildas har olika livslängd (halveringstid), från bråkdelar av sekunder till miljontals år. Uran- och plutoniumkärnor har mycket långa halveringstider.

Olika radioaktiva ämnen utsänder olika typer av strålning – alfa, beta eller gamma. Detta är, tillsammans med stråldosens storlek, avgörande för den påverkan som uppstår på levande organismer. Därtill har olika slags celler, vävnader och organ olika känslighet för strålningen.

Stråldoser till människa anges vanligen i sievert (Sv). Enheten anger sk effektiv dos, dvs den tar hänsyn till vilken biologisk verkan olika typer av strålning har på kroppens olika organ.

Den naturliga bakgrundsstrålningen från marken, den ofrånkomliga kosmiska strålningen och naturligt förekommande radioaktiva ämnen i kroppen ger varje svensk en årlig stråldos på ca en tusendels sievert (1 mSv). Adderas strålningen från radon i hus, medicinska undersökningar, medicinska behandlingar och övrigt, får en svensk i genomsnitt en årlig stråldos på ca 4 mSv. En mycket liten del kommer från kärnkraftanläggningarna (se tabell sid 16).

Även vid låga doser ger joniserande strålning ett litet tillskott till den naturliga frekvensen av skador på cellernas DNA-molekyler (och därmed på cellernas arvs massa). Skador på DNA-molekylerna kan i vissa fall, dock långtifrån alla, leda till att en cancercell bildas och så småningom utvecklas till en tumör. En liten ökning av frekvensen DNA-skador ger därför i princip en liten ökning av risken för cancer.

Vid riskbedömningar räknar man med att sannolikheten för cancer och ärftlig skada ökar proportionellt mot dosen och man räknar inte med att det finns någon säker tröskeldos under vilken risken är noll. Det ledande internationella expertorganet ICRP (the International Commission on Radiological Protection) räknar med att en engångsdos på 15 mSv ökar risken att dö i cancer med 0,1 procent.

Begreppet kollektivdos används när man vill ange vilken sammanlagd stråldos en viss grupp människor utsatts för. Den definieras som medeldosen i gruppen multiplicerad med antalet individer. Man kan då teoretiskt uppskatta risken för ett ökat antal cancerfall, oavsett gruppens storlek. En kollektivdos på 1 manSv uppskattas leda till en risk för 0,07 ytterligare cancerfall.

EFFEKTER AV DRIFTUTSLÄPP

De radiologiska effekterna i olika led i kärnbränslecykeln kan variera starkt, bl a beroende på de olika anläggningarnas tekniska standard och hur de är belägna i förhållande till tätbefolkade områden.

Som referensfall används en studie som nyligen genomförts av OECD/NEA:s strålskyddskommitté. Den avser effekter av ett års elproduktion i en 1 GWe tryckvattenreaktor med respektive utan en omgång upparbetning av det använda kärnbränslet (se tabell sid 16).

Svenska kärnkraftverk ger individdoser till de närboende som är jämförbara med referensfallet i tabellen, dvs av storleksordningen en miljondels Sv (μ Sv). Kollektivdosen till personalen i kraftverk och andra kärntekniska anläggningar har under senare år också legat i nivå med tabellens och enligt SSI/SKI:s årliga rapportering är 2001 det fjärde året i följd med sjunkande stråldoser till personalen vid de svenska verken.

Sammanfattningsvis kan konstateras att de radioaktiva utsläppen från ett kärnkraftverk under normal drift ger ett mycket litet bidrag till den indivi-

Stråldoser

Exempel på stråldoser

0,1 mSv	Dosen vid en flygning tur och retur över Atlanten. Den högsta årliga tillåtna stråldosen för människor som bor eller arbetar i närheten av ett kärnkraftverk.
1 mSv	Dosen vid en magröntgen. Den genomsnittliga årliga dosen från marken, den kosmiska strålningen och naturliga radioaktiva ämnen i kroppen. Den årliga dosen från marken kan variera avsevärt mellan olika områden.
4 mSv	Den sammanlagda årliga dosen från alla strålkällor för en svensk i genomsnitt. Dosen kommer från radon i hus, medicinska undersökningar och medicinsk behandling, naturlig bakgrundsstrålning och övrigt (kärnkraft, nedfall från kärnvapenprov och Tjernobylyolyckan).
50 mSv	Dosen vid medicinsk avbildning av sköldkörteln med radioaktiv jod. Högsta tillåtna dos enstaka år för personal med strålningsarbete. Den sammanlagda dosen får på fem år inte överstiga 100 millisievert.
500 mSv	Dosen till dem som bodde inom 10 km från kärnkraftverket i Tjernoby 1986 innan de evakuerades.
5000 mSv	Dödar på en gång de flesta som får denna dos över hela kroppen och som inte får intensivvård på sjukhus. Källa: SSI.

duella risken för cancer med den modell som i dag allmänt används för sambandet mellan stråldos och skaderisk.

Även för individer i den mest utsatta gruppen bland allmänheten är risktillskottet mindre än en hundratusendels procent per år, vilket är mycket lågt jämfört med många andra kända källor till ökad cancerrisk. Exempelvis ger ett kärnkraftverk ett årligt individuellt risktillskott från strålning långt under vad dosen från kosmisk strålning under en flygresor till något av de vanliga semestermålen ger.

Andra anläggningar som ingår i kärnbränslecykeln, men som inte finns i Sverige, kan ge högre men fortfarande små risktillskott (under en hundradels procent) till individer i omgivningen. Det är då främst anläggningar för uranutvinning och för upparbetning av använt kärnbränsle. För urangruvorna beror dosbelastningen i hög grad på hur väl lakrester och annat gruvavfall tas om hand.

Kärnklyvningsprocessen

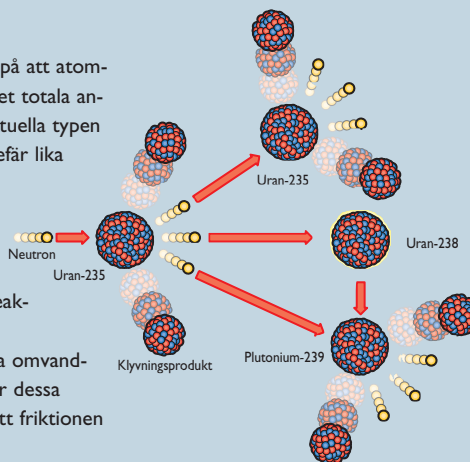
Elproduktionen i dagens kärnkraftverk bygger ytterst på att atomkärnor av uran med masstalet 235 (masstalet anger det totala antalet protoner och neutroner som bygger upp den aktuella typen av atomkärna) klyvs med hjälp av neutroner i två ungefär lika tunga delar.

De klyvningsprodukter som uppstår är atomkärnor av grundämnen som jod, cesium, strontium m fl.

Dessutom frigörs nya neutroner som kan klyva ytterligare urankärnor och på så sätt hålla igång en kedjereaktion.

En liten del av den ursprungliga urankärnans massa omvandlas till rörelseenergi hos klyvningsprodukterna och när dessa bromsas upp i kärnbränslet värms detta upp genom att friktionen omvandlar rörelseenergin till värme.

Värmen leds bort från reaktorhärden och får generera ånga som driver en turbin och en till denna kopplad elgenerator.

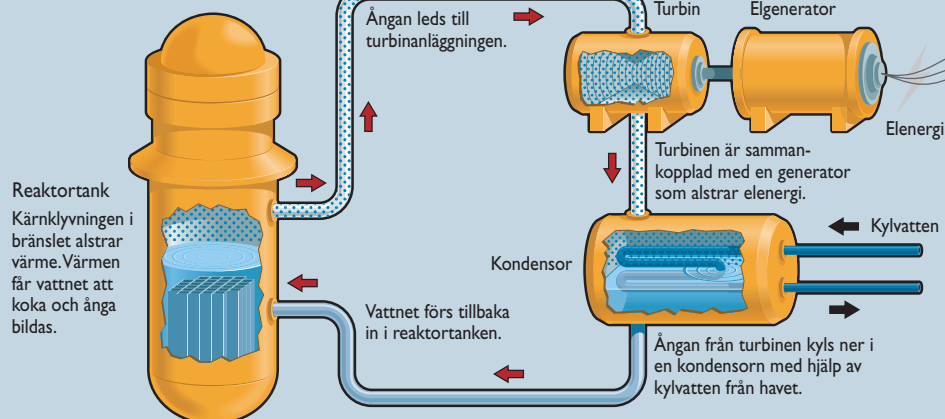


En del av neutronerna från kärnklyvnigen fångas in av uranatomer med masstalet 238 (uran-238), som är den typ av uranatom som naturligt uran huvudsakligen består av. Därvid bildas atomkärnor av plutonium som i sin tur kan klyvas av neutroner.

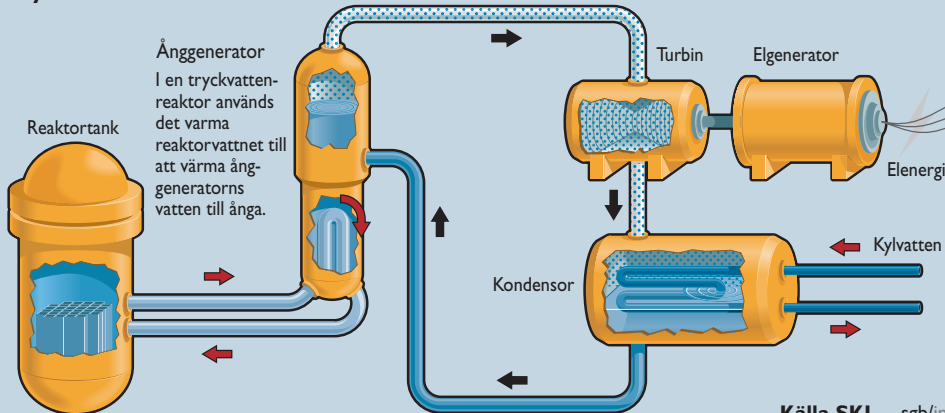
Klyvningsprodukterna är oftast radioaktiva, dvs omvandlas till andra ämnen genom radioaktivt sönderfall under utsändning av joniserande strålning. Den kallas så eftersom den kan bryta loss elektroner ur (jonisera) de atomer och molekyler som bygger upp all levande och död materia. När strålningen består av sk alfapartiklar (heliumkärnor) kallas den alfastrålning, medan betastrålning består av elektroner. Gammastrålning, slutligen, är en mycket kortvägig elektromagnetisk strålning av samma typ som röntgenstrålning.

Det radioaktiva sönderfallet kan ske i flera steg. Slutprodukten är stabila, icke radioaktiva atomkärnor. Den tid det tar för hälften av ett antal radioaktiva atomkärnor av viss typ att sönderfalla kallas halveringstid. Halveringstiderna för olika radioaktiva ämnen varierar mellan bråkdelar av sekunder och miljontals år. Förekomsten av radioaktiva ämnen kan mätas även vid mycket låga nivåer genom den strålning som utsänds.

Kokvattenreaktor



Tryckvattenreaktor



Källa SKI. sgb/info

Vidare kan konstateras att för huvuddelen av dem som arbetar i kärnkraftverken är doserna låga och hälsoriskerna skiljer sig inte från annan industriell verksamhet med god arbetsmiljö. Mindre grupper har arbetsuppgifter som gör att de utsätts för mer strålning, vilket gör att hälsoriskerna blir jämförbara med arbete i processindustri med mer besvärlig arbetsmiljö.

STRÅLNINGSPÅVERKAN PÅ MILJÖN

Skyddet av människan har dominerat strålskyddsarbetet ända fram till de allra senaste åren. Bedömningen har varit att ett gott strålskydd för människor också ger ett tillräckligt gott skydd för andra levande arter i så motto att enstaka individer skulle kunna skadas, men inte arten som sådan och inte heller balansen mellan arter. Dessa bedömningar har även legat som grund för ICRPs rekommendationer.

Under senare år har ökade insatser gjorts för att kartlägga joniserande strålningens miljöpåverkan och på att utveckla system för miljöskydd som säkerställer att olika arter, populationer och biotoper kan ges ett fullgott skydd. Mycket arbete återstår dock innan man har utvecklat skyddskriterier som är internationellt erkända och tillämpade på samma sätt som skyddet för människor. ICRP har i augusti 2002 på sin hemsida lagt ut ett första utkast till förslag till uppläggning av det fortsatta arbetet för att få in synpunkter.

ANNAN MILJÖPÅVERKAN

En urangruva med tillhörande lagningsanläggning kan ta i anspråk stora markytor – flera tusentals hektar om det rör sig om dagbrott. En gruva försörjer dock många kärnkraftreaktorer. För en reaktor med effekten 1 GWe som drivs i 40 år blir andelen av ytan som tas i anspråk ett par hektar.

Med höga miljökrav på gruvbrytningen kan kemisk och annan miljöpåverkan från lakrester och annat gruvavfall hållas liten jämfört med utvinning av flera andra energiråvaror. Det finns dock gruvor av varierande standard i drift i olika delar av världen.

Stråldoser från långlivade ämnen

Kollektivdoserna till allmänheten uppkommer främst som följd av att mycket stora befolkningsgrupper (många hundra miljoner människor enligt beräkningsmodellerna) utsätts för mycket små årliga stråldoser, långt under vad den mest riskutsatta gruppen uppskattas få och detta under många generationer framåt i tiden. Risktillskottet för varje individ blir alltså ytterst litet.

Kollektivdoserna kommer främst från utsläpp av ett fåtal radioaktiva ämnen med lång halveringstid och som kan spridas långt. Från driften av själva kärnkraftreaktorerna rör det sig främst om utsläpp av kol-14 (halveringstid 5730 år). Från utsläpp från anläggningar rör det sig också om kol-14 samt jod-129 (halveringstid 15,9 miljoner år) och krypton-85 (halveringstid 10,8 år).

Utsläppen sker både till luften och till vatten. Från uranbrytningen rör det sig främst om olika naturligt radioaktiva sönderfallsprodukter från uran som blir kvar i lakresterna och som får en ökad spridning lokalt och regionalt jämfört med om sönderfallsprodukterna bildats i obruten malm.

Det pågår en vetenskaplig diskussion om det rimliga i att använda kollektivdosberäkningar för riskuppskattningar avseende stora grupper människor som utsätts för mycket låga doser jämfört med den naturliga bakgrundsstrålningen. Å andra sidan har såväl Sverige som EU satt upp långsiktiga miljöskyddsmål, enligt vilka alla utsläpp av människoframställda ämnen med hälso- och miljöpåverkan av lång varaktighet skall bringas ned till nära noll.

Anläggningar för anrikning av uranet med avseende på uran-235 är också relativt utrymmeskrävande – typiskt flera hundra hektar. Liksom för urangruvan blir dock den andel av ytan som tas i anspråk för den enskilda reaktorn liten. Miljöpåverkan i övrigt domineras av de stora mängder elenergi som går åt vid anrikningen, särskilt om denna el produceras med fossila bränslen och i synnerhet då kol.

Själva kärnkraftverket tar, om flera reaktorer samlokaliseras, ett tiotal hektar mark i anspråk per reaktor. Vid kustförlagda verk som de svenska påverkas något tusentals hektar havsytta av kylvattenutsläppet i form av förhöjd vattentemperatur. Effekterna på det lokala växt- och djurlivet har, bland annat vid provningar av tillstånd om effekthöjning, bedömts som godtagbara.

Led i kärnbränslecykeln	Dos till allmänheten (generiska beräkningar)			Dos till anställda (typiska driftdata)	
	Kollektivdos från ett GWårs utsläpp summerat över 500 års exponering (manSv/GWår)		Medelvärde för årlig individdos till mest utsatt grupp (mSv/år)	Årlig kollektivdos (manSv/GWår)	
	Direktdepon.	Upparbetning (en omgång)		Direktdepon.	Upparbetning (en omgång)
Brytning och lakning av uranmalm	1,0 ⁽³⁾ {1-1000} ⁽²⁾	0,8 ⁽³⁾ {1-1000} ⁽²⁾	0,30-0,50 (0,020-0,940) ⁽¹⁾	0,02-0,18	0,016-0,14
Konvertering och anrikning				0,008-0,02	0,006-0,016
Tillverkning av bränsle	0,0009		0,020 (10 ⁻⁶) ⁽¹⁾	0,007	0,094
Produktion av elenergi	0,6	0,6	0,0005-0,0008	1,0-2,7	1,0-2,7
Upparbetning Förglasning	Ej tillämpligt	1,2 (0,6) ⁽¹⁾	0,40 (0,005-0,059) ⁽¹⁾	Ej tillämpligt	0,014
Transporter	Inget väsentligt bidrag	Inget väsentligt bidrag	Inget väsentligt bidrag	0,005-0,02	0,005-0,03
Slutförvar	⁽⁴⁾	⁽⁴⁾	⁽⁴⁾	Inget väsentligt bidrag ⁽⁵⁾	Inget väsentligt bidrag ⁽⁵⁾
Totalt	~1,6	~2,6	Ej tillämpligt	1,04-2,93	1,14-2,99

Källa: Radiological Impact of Spent Fuel Options – A comparative study; OECD/NEA, Paris 2000.

Noter till tabellen:

1. Anläggnings-specifika data ges inom parentes. De visar resultatens känslighet för olika antaganden om befolkningsfördelning, olika befolkningsgruppers vanor och den miljö de lever i, samt om utsläppsförhållanden.
2. Data inom klammer indikerar spridning i värden i andra studier som bl a summerat doser över längre tid än 500 år.
3. Kollektivdoser från brytning och lakning av uranmalm kan stiga till några tiotals mansievert om lakrester inte tas om hand ordentligt.
4. Konstruktionsmålet för moderna slutförvar är att inga utsläpp skall ske under de första 500–1 000 åren. Enligt SSI:s strålskyddsföreskrift SSI FS 1998:1 skall ett svenskt slutförvar av använt

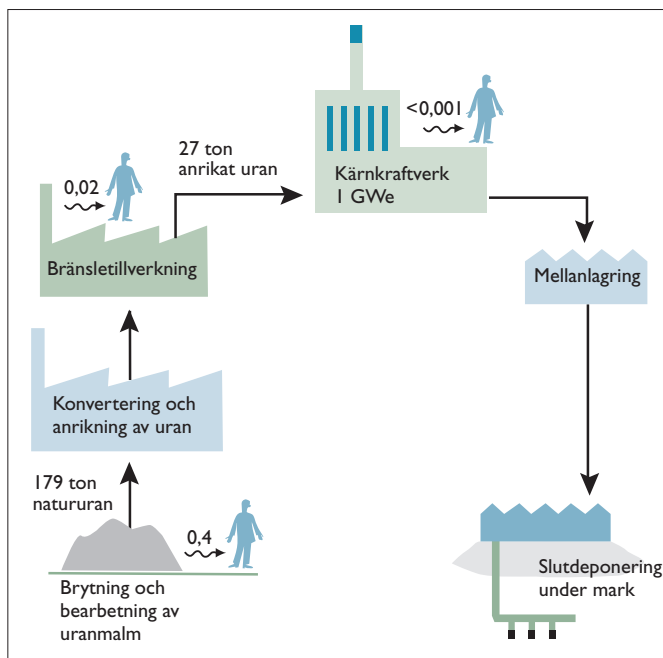
kärnbränsle utformas så att årlig dos till en representativ individ i mest utsatt grupp skall ligga under ca 0,02 mSv – även för tider överstigande 1 000 år. Se vidare det särskilda avsnittet om slutförvar.

5. Driftdata saknas än så länge från anläggningar för inkapsling och slutförvaring av använt kärnbränsle. Ett rimligt antagande är att dosbelastningen kan bli av samma storleksordning som transportererna, dvs inte bidra väsentligt till totalsumman per GWår. Inte heller dosbelastningen vid rivningen av anläggningarna, utslagen över ca 40 års drift, torde ge något väsentligt bidrag till totalsumman. Denna bedömning stöder sig främst på erfarenheter från större underhålls- och reparationsarbeten.

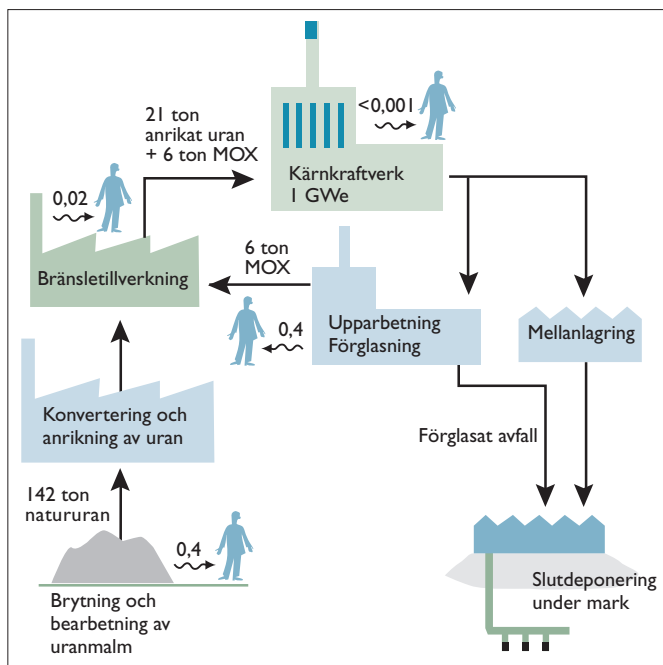
En uppberetningsanläggning för använt kärnbränsle kan ta något hundratal hektar mark i anspråk, inkluderande mellanförvar för använt kärnbränsle och olika typer av kärnavfall. Utslaget per reaktor som betjänas blir ytan liten. Miljöpåverkan är vä-

sentligen begränsad till radioaktiva processutsläpp från uppberetningen (se tabellen ovan). Uppberetning av använt bränsle från svenska kärnkraftverk förekommer inte längre, men har tidigare skett i liten omfattning.

Det svenska mellanlagret för använt kärnbränsle (CLAB) tar en markyta på något tiotal hektar i anspråk, liksom det gemensamma slutförvaret för låg- och medelaktivt avfall (SFR). Ett kommande slutförvar för använt kärnbränsle beräknas också behöva en markyta på något tiotal hektar för ovanjordsanläggningarna medan förvaringsutrymmena på stort djup i berget kan uppta en yta av något hundratal hektar.



Siffrorna anger typisk dos i mSv till individ i mest utsatt grupp i närheten av respektive anläggning från den verksamhet som är knuten till ett års elproduktion i ett kärnkraftverk med en effekt av 1 GWe. Det kan vara stora skillnader i dos mellan olika anläggningar av samma typ, se tabellerna på motstående sida.



Kärnbränslecykeln från urangruva till slutförvar ser olika ut beroende på om det använda kärnbränslet slutförvaras direkt (bilden ovan) eller om det upparbetas (bilden nedan).

Vid upparbetningen separeras uran och plutonium kemiskt från övriga ämnen i det använda bränslet, varefter de återanvänds i sk blandoxidbränsle, MOX, som alltså innehåller en blandning av uran- och plutoniumoxid. Vanligt uranbränsle innehåller enbart uranoxid när det sätts in i reaktorn och dess plutonium bildas alltså under drift. Se bilden på sid 14.

Olycksrisker och säkerhetsarbete

Säkerhet, i betydelsen att förebygga olyckor och begränsa deras skadeverkningar om de ändå skulle inträffa, är en nyckelfråga för kärnkraften av två skäl.

För det första leder ett reaktorhaveri, om det medför utsläpp till omgivningen av någon procent eller mer av härdinnehållet av radioaktiva ämnen som jod och cesium, till mycket svåra följdverkningar för samhället. Antalet dödsfall som kan sättas i direkt samband med reaktorhaveriet kan begränsas genom olika beredskapsåtgärder men de psyko-sociala följdverkningarna kan bli mycket svåra. De områden som drabbas svårast av radioaktiva markbeläggningar kan behöva utrymmas under tidrymder som kan sträcka sig från några veckor till något sekel. De drabbade områdena kan vid ogynnsamt väder uppgå till tusentals km² och fläckvis finnas på upp till några tiotal mil från reaktorn. Begränsningar i produktionen av vissa livsmedel kan behövas över ännu större områden.

För det andra leder ett reaktorhaveri med svåra härdsador sannolikt till en totalförlust av reaktorn och mycket stora uppröjningskostnader. Enbart reaktorn representerar ju en investering på något tiotal miljarder kronor. Det gör att reaktorägare och försäkringsbolag har ett starkt egenintresse av hög säkerhet enbart för att skydda investeringen i reaktorn.

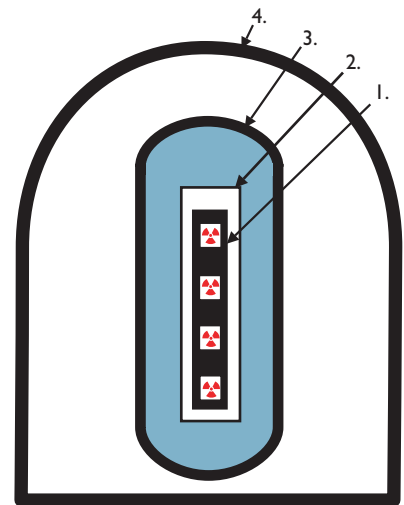
REAKTORSÄKERHET

Risker förknippade med svåra haverier är störst vid själva kärnkraftreaktorerna. I reaktorerna finns ju den största tillgången på energi med potentiell förmåga att sprida radioaktiva ämnen till omgivningen. Reaktorsäkerhet är alltså en fråga om att hålla de radioaktiva ämnena i härden väl inneslutna och att behärska de krafter som kan leda till spridning av radioaktivitet. Säkerheten

vid lättvattenreaktorer av den typ som finns i Sverige bygger på följande tekniska konstruktionsprinciper:

- Grundkonstruktion som ger stabil drift och få källor till driftstörningar.
- Flerfaldiga fysiska barriärer (bränslekapsling, primärsystem, inneslutning) mellan kärnbränsle och omgivning.
- Flerfaldiga system som skyddar dessa fysiska barriärer mot skador under normal drift, liksom vid driftstörningar och tänkbara haveriflöpp såsom rörbrott och elbortfall.

Man säger att reaktorerna har ett djupförsvar mot utsläpp av radioaktiva ämnen till omgivningen.



Flerfaldiga barriärer mellan de radioaktiva ämnena i reaktorhärden och omgivningen:

1. Keramiska bränslekulsar med god förmåga att kvarhålla många radioaktiva ämnen.
2. Hermetiskt tillslutna kapslingsrör omger bränslekulsarna.
3. Reaktortryckkärn med anslutande rörsystem.
4. Reaktorinneslutning som kan förhindra eller åtminstone kraftigt begränsa radioaktiva utsläpp om föregående barriärer skulle skadas.

Detta eftersom samtliga barriärer måste brytas igenom för att ett större utsläpp skall ske.

Inneslutningen är den yttersta barriären mot utsläpp. I lättvattenreaktorer av den typ som finns i Sverige är den konstruerad för att hålla även om all upplagrad värmeenergi i det heta vattnet i såväl reaktortank som anslutande rörsystem skulle dumpas i inneslutningen efter ett rörbrott tillsammans med en stor del av härdens innehåll av radioaktiva ämnen.

I svenska reaktorer är inneslutningen dessutom försedd med ytterligare skyddssystem, bl a filtrerad tryckavlastning i form av haverifilter, för att så långt rimligen är möjligt klara påkänningarna även vid mycket svåra haveriförlopp inklusive härdsmälta. Konstruktionsmålet är att utsläppen vid flertalet typer av svåra förlopp skall begränsas till:

- radioaktiva ädelgaser (med en skadebild grovt motsvarande ett måttligt klorgasutsläpp från en fabrik eller transport);
- mindre än 0,1 procent av härdinnehållet av radioaktiva ämnen som kan ge långvariga markbeläggningar, såsom t ex cesium. Detta motsvarar mindre än en tiondel av den mängd cesium som föll ned över Sverige efter Tjernobylyckan.

Vetenskapligt sett går det inte att helt utesluta haveriförlopp som leder till större utsläpp om de utsläpps begränsande systemen inte skulle fungera som avsett. I de av regeringen fastställda konstruktionsmålen behöver haveriförlopp som bedöms ha ytterst låg sannolikhet inte beaktas. Som exempel nämns tankbrott. Det kan heller inte uteslutas att vissa typer av terroristangrepp eller krigshandlingar kan leda till utsläpp, även om angrepp på kärnkraftreaktorer anses överträda samma gränser för krigföringen som insättande av massförstörelsevapen.

TMI OCH TJERNOBYL

Haveriet i Three Mile Island i USA 1979 orsa-

kades av brister i flera länkar i den kedja av åtgärder som skall skapa säkerhet. Inte minst brast det i såväl kraftföretagets som tillsynsmyndighetens analys av och återföring från tidigare drifterfarenheter och tillbud. Haveriet medförde att stora delar av härdens överhettades och smälte ned varvid stora mängder radioaktiva ämnen frigjordes. En väl fungerande inneslutning gjorde att utsläppen till omgivningen ändå blev små och motsvarade ungefär utsläppen från något tiotal års normal drift.

Haveriet i Tjernobyli i Ukraina 1986 hade sina rötter i stora brister i djupförsvaret. Härdens dåliga stabilitet i vissa driftlägen så att kärnklyv-



För att nå hög säkerhet räcker det inte med en reaktorkonstruktion med god grundstruktur. Det krävs också att anläggningen:

- har en verifierad teknisk tillförlitlighet genom för ändamålet väl kvalificerade program för kontroll och provning som verifierar att tillfredsställande säkerhetsmarginaler upprätthålls under anläggningens hela drifttid;
- drivs och underhålls av en organisation med god grundstruktur, kännetecknad av bl a tydliga ansvarsförhållanden och kompetent personal;
- har en verifierad kvalitet i alla processer som berör samspelet människa-teknik-organisation (MTO) genom bl a väl fungerande intern säkerhetsgranskning och kvalitetssäkring;
- har väl fungerande system för att löpande analysera och dra lärdom av egna och andras drifterfarenheter och forskning;
- har ett program för en periodvis återkommande övergripande säkerhetsgranskning för att kontrollera att alla ovanstående komponenter i säkerhetsarbetet fungerar som avsett.

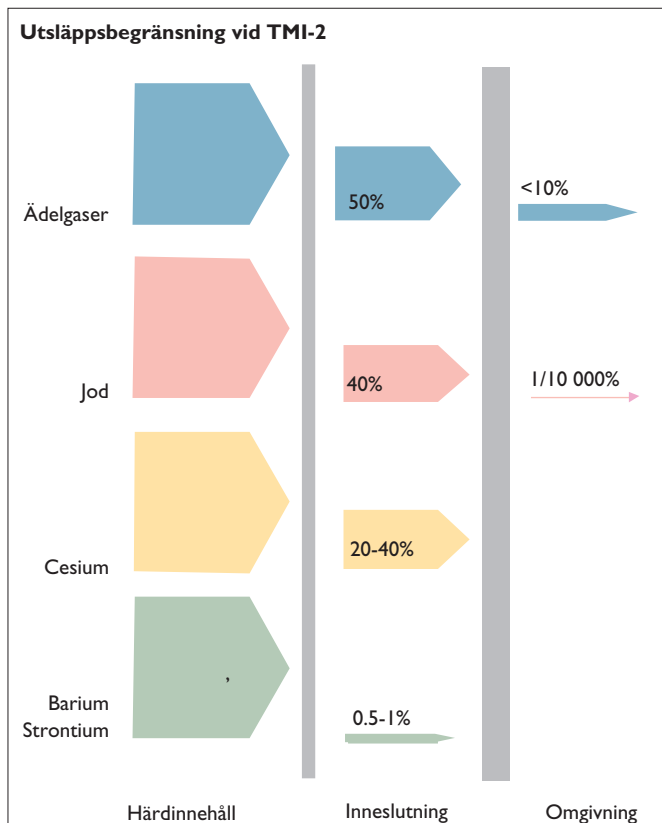
Allt detta kan ses som länkar i en kedja som skapar förutsättningar för hög säkerhet.

ningen och därmed effektutvecklingen kunde »skena«. Vidare omgavs härden inte av en tillräckligt stark inneslutning och sist men inte minst fanns stora brister i säkerhetsmedvetandet hos både driftorganisation och tillsynsmyndighet.

Följden blev ett totalhaveri med reaktorhärden delvis nedsmält, delvis utkastad på gården. Flera tiotals procent av härdinnehållet av jod, cesium och andra radioaktiva ämnen frigjordes direkt till atmosfären och spreds med vindar och nederbörd över stora delar av Europa.

FNs strålningsvetenskapliga kommitté, UNSCEAR, sammanfattade i en rapport i juni 2000 sin bedömning av de säkert identifierade strålningsrelaterade hälsoeffekterna av olyckan:

- I den mest strålningsutsatta gruppen, räddningsarbetarna, dog 31 i nära anslutning till olyckan och ytterligare 11 under åren 1987–98.



Källa: SSI.

- Fram till år 2000 hade ca 1 800 fall av sköldkörtelcancer diagnostiserats bland de drygt 10 miljoner barn under 18 år som fanns i de svårt nedfallsdrabbade områdena vid olyckstillfället. Några tiotal av dessa har dött. Ytterligare fall förväntas inträffa under kommande år.

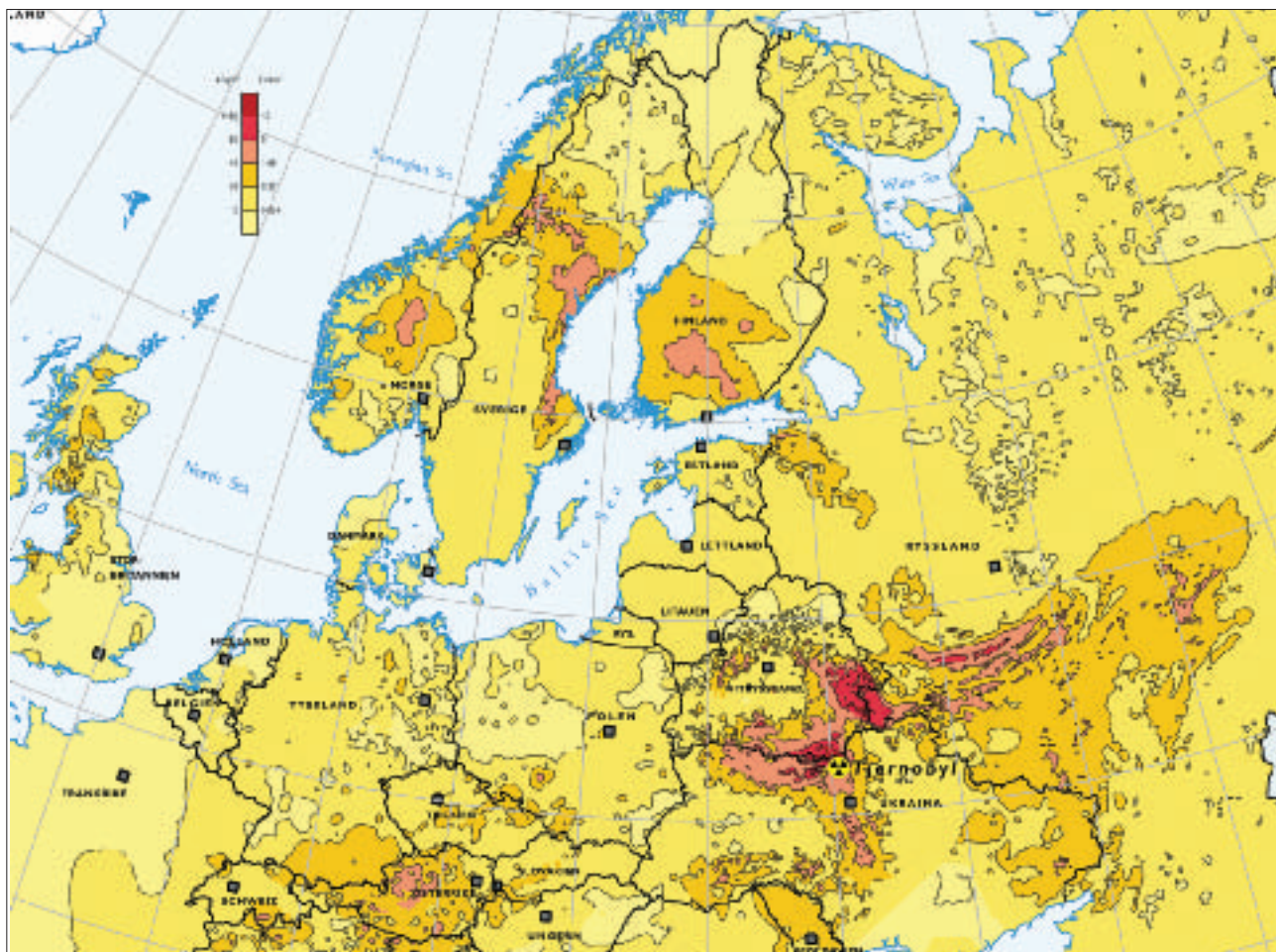
Andra former av cancer har inte för någon befolknings- eller åldersgrupp kunnat sättas i statistiskt samband med strålningen från Tjernobyl. De många tusen extra cancerfall som teoretiskt kan beräknas utifrån de kollektivdoser haveriet orsakade, drunknar helt i de normala variationerna i det mycket stora antal cancerfall som av andra orsaker drabbar Europas innevånare.

I Ukraina, Vitryssland och Ryssland lider dock ett stort antal av de hundratusentals människor som flyttats från de mest drabbade områdena fortfarande, femton år efter olyckan, av psyko-sociala följdverkningar. Till en del hänger detta också samman med de ekonomiska och politiska förhållandena i dessa länder efter Sovjetunionens upplösning.

HÖG SÄKERHET KRÄVER STÄNDIGT LÄRANDE

Förutom i TMI och Tjernobyl har fram till nu inga allvarliga haverier inträffat i civila kärnkraftreaktorer. Flera haverier i reaktorer för militära ändamål är kända. En av de svåraste är olyckan i Windscale i England 1957, som inträffade i en reaktor avsedd för produktion av vapenplutonium.

Analys av drifterfarenheter och tillbud efter TMI och Tjernobyl har emellertid pekat på områden där säkerheten har behövt förbättras. De samlade erfarenheterna från internationellt reaktorsäkerhetsarbete efter TMI och Tjernobyl, sådana de redovisats inom ramen för IAEA och OECD/NEA, visar dock på att ett systematiskt säkerhetsarbete med fortlöpande omprövning av tidigare säkerhetsanalyser på grundval av drifterfarenheter, tillbud och metodutveckling ger förmåga att identifiera och åtgärda tidigare oupptäckta svagheter i konstruktion och handhavande innan de medfört allvarliga tillbud eller olyckor.



Nedfall av radioaktivt cesium efter Tjernobyl-olyckan. ©EC/IGCE,Roshydromet (Russia)/Minchernobyl(Ukraine)/Belhydromet (Belarus), 1998.

SÄKERHET VID ÖVRIGA ANLÄGGNINGAR

Riskerna för olyckor med omfattande konsekvenser vid övriga anläggningar i kärnbränslecykeln bedöms allmänt som lägre än vid själva reaktorerna, främst eftersom det finns mycket mindre energimängder tillgängliga i dessa anläggningar. Därmed minskar risken för snabb spridning av radioaktiva ämnen till omgivningen vid ett svårt haveri.

I uppberedningsanläggningar hanteras emellertid mycket stora aktivitetsmängder, delvis i flytande form, som kan ge omfattande skadeverkningar. Såväl i dessa anläggningar som i anrikningsanläggningar och bränslefabriker kan

oavsiktliga kärnklyvningsreaktioner starta om inte mängden klyvbart material (uran och plutonium) i olika delar av anläggningarna hålls under strikt kontroll.

Därför ställs samma krav på kvaliteten i säkerhetsarbetet vid dessa anläggningar som vid kärnkraftreaktorerna. Det gäller även andra kärntekniska anläggningar, såsom mellanlager för använt kärnbränsle och anläggningar för inkapsling och slutlig förvaring av använt kärnbränsle och kärnavfall.

SÄKERHET VID TRANSPORTER

IAEAs rekommendationer för säkerhet vid trans-

porter av kärnbränsle och radioaktiva ämnen har arbetats in i nationella och internationella föreskrifter. Grundprincipen är att transporter ska ske i typgodkända behållare, konstruerade och typprovade för att hålla för alla påkänningar som behållaren kan utsättas för under transporten

utan att radioaktivitet frigörs till omgivningen. Internationella erfarenheter pekar också på att en mycket hög säkerhet har kunnat upprätthållas vid transporter inom kärnbränslecykeln. Även här gäller dock att säkerhetsmedvetandet måste upprätthållas i alla led.

Tillgång till klyvbart material

Uranmineral är relativt ymnigt förekommande och den gängse uppskattningen är att man med konventionella tekniker kan hitta och utvinna uran motsvarande ungefär 250 års förbrukning på nuvarande nivå.

Världens kärnkraftreaktorer förbrukar tillsammans motsvarande ca 60 000 ton naturligt uran per år. De kända tillgångarna motsvarar mer än 70 års förbrukning på nuvarande nivå och av dessa är fyndigheter motsvarande nära 40 års förbrukning väl kartlagda och bedömda som ekonomiska att utvinna redan i dag.

Det finns med dagens uranpriser och efterfrågan ytterst små marknadsmässiga drivkrafter att leta efter ytterligare fyndigheter. Uranmalm har

inget annat användningsområde än som energiråvara.

Då kärnkraftverkens kostnadsbild domineras av kapitalkostnaderna (se sid 6), kan priset på råuran flerdubblas utan att det påverkar priset per kWh med mer än några få öre.

Reaktorteknik och bränslecykler kan utvecklas så att man kan få ut upp till 60 gånger mer energi ur varje kg klyvbart material, t ex genom att använda bridreaktorer. Med dagens uranpriser anses dock tekniken alltför komplicerad och dyrbar för att vara kommersiellt intressant.

Även torium kan användas som klyvbart material, vilket möjliggör utnyttjande av ytterligare mycket stora reserver av energiråvara.

Ännu ett alternativ är att ta vara på den låga halt av naturligt uran som finns i havsvatten. De potentiella tillgångarna är mycket stora, men utvinningstekniken måste utvecklas.

Försörjningstryggheten är mycket hög när det gäller kärnbränsle. I dag domineras visserligen utvinningen av råuran av ett fåtal stater men det finns gott om kända tillgångar i många av jordens länder och regioner. Även Sverige har stora kända – men lågvärdiga – urantillgångar. Anrikningstjänster kan köpas på många håll i världen. Likaså finns många tillverkare av bränsleelement till reaktorer, varav en anläggning är belägen i Sverige.

Om det i en framtid skulle bedömas nödvändigt att bygga upp beredskapslager, är det tekniskt enkelt att anordna ett sådant för flera årsbehov.

Kärnavapensspridning

En tekniskt och ekonomiskt någorlunda utvecklad nation kan i dag ta fram egna kärnladdningar utan att stöta på oöverstigliga svårigheter. Att framställa vapenplutonium i kärnreaktorer är inte den enda vägen. Exempelvis valde Sydafrika och Irak att gå vägen över höganrikning av uran.

Dessa tekniska möjligheter motverkas av att det i dag finns ett starkt och väl etablerat internationellt politiskt tryck för att hindra ytterligare spridning. Det internationella icke-spridningsavtalet (NPT) till vilket över 180 stater anslutit sig har här en nyckelroll. IAEAs befogenheter att kontrollera efterlevnaden av NPT har stärkts.

Utvecklingen de senaste tio åren har möjligen ökat risken något för att subnationella grupper och stater som står utanför IAEAs kontroll kan skaffa sig tillgång till klyvbart material för enklare typer av kärnladdningar.

De samlade internationella erfarenheterna hittills pekar mot att förhindrande av spridning av kärnladdningar i första hand är en global säkerhetspolitisk fråga, där användningen av kärnkraft för fredliga ändamål torde ha liten betydelse.

Tillgång till teknisk och industriell kompetens

När det svenska kärnkraftsprogrammet byggdes upp gjorde såväl staten som industrin stora satsningar på att bygga upp en nationell kompetens. I dag är läget annorlunda och på senare år har upprätthållandet av den nationella kompetensen krävt särskild uppmärksamhet från såväl industri som tillsynsmyndigheter.

Ett kärnkraftsprogram kräver en omfattande nationell infrastruktur som upprätthåller erforderlig kompetens för konstruktion, uppförande, drift, underhåll och rivning av alla erforderliga anläggningar. Det behövs även kompetens för att upprätthålla erforderlig nationell säkerhets- och strålskyddstillsyn. En del av denna kompetens kan naturligtvis handlas upp utomlands men icke desto mindre behövs en betydande nationell bas.

Utvecklingstendenserna mot minskad tillgång på kompetens inom området gäller inte bara Sverige, utan är likartade inom hela EU. Frankrike, med sitt stora kärnkraftsprogram och ännu bara partiellt avreglerade elmarknad, utgör här ett undantag.

Frankrike och Storbritannien upprätthåller naturligtvis också kompetens för sina militära program, som även omfattar reaktorer för marint bruk. I Finland kan det planerade byggandet av en femte reaktor förväntas betyda mycket för upprätthållandet av den nationella kompetensen.

I USA har det också skett omfattande strukturrationaliseringar inom den reaktortillverkande industrin och antalet högskoleinstitutioner med kärnteknisk inriktning har minskat kraftigt. Den samlade nationella kompetensen kan dock förväntas upprätthållas på en tillräcklig nivå för fortsatta satsningar på kärnkraft.

I Japan, Korea, Kina och Indien, som alla fortsätter att bygga kärnkraftverk, sker en fortsatt satsning på utveckling av den nationella tekniska infrastrukturen på kärnkraftområdet – inklusive reaktortillverkning. Detsamma gäller Ryssland, även om landets nuvarande ekonomiska problem också drabbar kärnkraftindustrin och forskningsinstitutionerna. Även andra länder i världen satsar på reaktorutveckling, bl a Sydafrika.

Sammanfattningsvis kan konstateras att vidmakthållande av den kompetens och den industriella infrastruktur som behövs för säker och ekonomisk drift av befintliga kärnkraftsprogram inte är ett akut problem vare sig för Sverige eller EU. Att det däremot är en fråga som kräver fortsatt uppmärksamhet från både industri och tillsynsmyndigheter har tydligt markerats av bl a SKI.

Reaktorteknisk utveckling

Ekonomiskt och säkerhetsmässigt vidareutvecklade reaktorer finns för beställning redan i dag för anläggningar som avses att tas i drift under de närmaste tio åren.

På 10–20 års sikt kan helt nya reaktortyper finnas i produktion – gas- eller metallsmältkylda och med nya bränslecykler.

I Sverige liksom inom EU är lättvattenreaktorer av kokvattentyp (BWR) eller tryckvattentyp (PWR) helt dominerande i dag. Även i EUs kandidatländer dominerar dessa reaktortyper, liksom i USA, Japan och Sydkorea. Det finns dock ett betydande antal tungvattenreaktorer av CANDU-typ i drift, både i teknikens hemland Kanada och i t ex Indien som har ett drygt tiotal. I Ryssland svarar RBMK-reaktorer av Tjernobyl-typ för omkring hälften av den installerade kärnkrafteffekten.

Konstruktioner som är färdiga i dag är de enda realistiska för reaktorer som skall tas i drift inom tio år. Det följer av att total besluts- och byggtid för ett reaktorprojekt knappast ligger under 7–8 år.

Vidareutvecklingar av dagens BWR- och PWR-konstruktioner finns färdiga att offerera inom EU samt i USA, Ryssland, Japan och Sydkorea.

Både ekonomi och säkerhet har förbättrats. Vissa nya reaktorkonstruktioner har ett betydande inslag av s k passiva säkerhetssystem, dvs system som inte är beroende av pumpar eller elkraft för sin funktion.

För nya reaktorer i Europa kommer det att ställas mycket höga krav på skydd mot utsläpp även vid mycket svåra händelseriförlopp. Utsläpp vid sådana förlopp skall kunna begränsas så långt att beredskapsåtgärder som utrymning bara skall behövas i reaktorns omedelbara omgivning och alla restriktioner om användningen av olika födoämnen skall kunna avgränsas i tid och rum. Krav kommer också att ställas på ytterligare förstärkt

Bridreaktorer

Ett antal prototyper till s k bridreaktorer har utvecklats och provats under de senaste femtio åren i en rad olika länder. De flesta projekt har lagts ner av tekniska och ekonomiska skäl. Ryssland har dock en bridreaktor med effekten 560 MW_e i reguljär drift sedan 15 år med god tillgänglighet, i genomsnitt drygt 70 procent.

Bridreaktorer kan konstrueras och drivas så att de samtidigt som de förbränner plutonium producerar lika mycket eller ännu mer av ämnet genom neutronbestrålningen av det naturliga uran som också tillförs reaktorhärden. Bränslecykler som använder bridreaktorer eller kombinationer av bridreaktorer och vanliga lättvattenreaktorer utnyttjar det potentiella energiinnehållet i natururan långt bättre än vad lättvattenreaktorer ensamma gör.

Bridreaktorer är dock komplicerade anläggningar med särskilda säkerhetsproblem. De kräver därtill upprepade upparbetningar av det använda bränslet med åtföljande processutsläpp till omgivningen (se tabellen på sid 16). Samtidigt minskar dosbidraget från uranutvinningen genom att väsentligt mindre natururan går åt för samma elproduktion.

Med dagens uranpriser på världsmarknaden är bridreaktorer inte ekonomiskt konkurrenskraftiga.

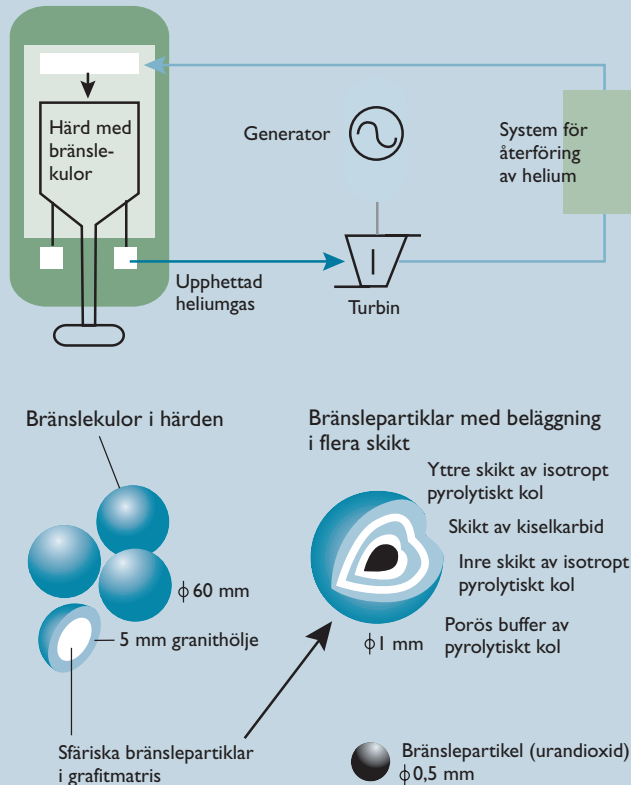
skydd mot flygplansstörtningar och sabotage.

På längre sikt, 10–20 år, kan helt nya reaktortyper vara framtagna för kommersiellt bruk. De kan komma att använda andra kylmedel – t ex heliumgas eller smälta metaller – och andra bränslecykler, t ex baserade på torium. Målen för denna utveckling är bl a ekonomisk konkurrenskraft, hög säkerhet, bättre bränsleutnyttjande och mindre mängder långlivat radioaktivt avfall.

Två internationella samarbetsprojekt tilldrar sig särskilt intresse. Det ena är det s k Generation IV International Forum, GIF. I GIF deltar för närvarande tio länder: Argentina, Brasilien, Kanada, Frankrike, Japan, Sydkorea, Sydafrika, Schweiz, Storbritannien och USA.

Syftet är att identifiera och utvärdera de reaktortyper som bedöms ha de bästa förutsättningarna att bli »fjärde generationens kärnkraftreakto-

PBMR = Pebble Bed Modular Reactor



Källa: ESKOM

En av de reaktorer som tilldrar sig intresse inom ramen för GIFs arbete är en heliumkyld högtemperaturreaktor, Pebble Bed Modular Reactor. Man räknar med att bygga den i moduler med elektrisk effekt på cirka 100 MWe. Ett större kraftverk kan då byggas upp stegvis, modul för modul.

Utifrån den bas tidigare arbeten i bl a Tyskland lagt för gaskylda reaktorer, började det sydafrikanska kraftföretaget ESKOM studera PBMR-konceptet 1993. Arbetet drivs nu som ett internationellt industrisamarbete med ESKOM som en av parterna.

En PMBR kan i princip ges en rad goda inbyggda säkerhetsgenskaper. Bränslepartiklarnas skyddsskikt av bl a kiselkarbid hävdas också ha en mycket god förmåga att hålla de radioaktiva ämnena i det använda bränslet inneslutna under hundratusentals år i ett slutförvar.

Mycket av både ekonomi och säkerhet torde dock komma att bero på huruvida man fullt ut kan behärska delvis nya typer av material- och tillverkningsproblem. Både Sydafrikas och USAs kärnkraftinspektioner har inlett förberedande säkerhetsgranskningar av PBMR-konceptet. Också IAEA har inlett en studie av säkerhetsfrågor knutna till PBMR.

I en reaktor av PBMR-typ utgörs bränslet av ca 350 000 grafitklädda kulor med en diameter av 60 mm. Varje kula innehåller i sin tur upp till 15 000 små sfäriska partiklar (diameter ca 1 mm) med en kärna av uranoxid som omges av skyddsskikt av bl a kiselkarbid.

Bränslekulorna kyls med heliumgas som pumpas genom hårdens. Utloppstemperaturen är ca 900°C och trycket typiskt 7-8 MPa. Den upphettade heliumgasen får driva en gasturbinanläggning innan den återförs till reaktorn.

Färska bränslekulor fylls på uppfifrån och utbrända bränslekulor tas ut nertill. Kärnklyvningen kontrolleras med styrstavar som löper i det grafitshölje som omger hårdens.

rer» med sikte på mer omfattande kommersiella tillämpningar i tidsperspektivet 20–30 år. En första avrapportering med förslag till fortsatt handlingsstrategi planeras ske i mars 2003.

Det andra internationella samarbetsprojektet (INPRO) har IAEA startat med stöd av frivilliga bidrag. Deltagare i projektet var i slutet av 2001 Argentina, Kanada, Kina, Tyskland, Indien, Ryssland, Spanien, Schweiz, Nederländerna, Turkiet och EU-kommissionen.

INPRO är ett brett upplagt och långsiktigt projekt med uppgift att studera innovativa reaktorer och kärnbränslecykler med hög inneboende säker-

het, liten inverkan på miljön och minimal risk för kärnvapenspridning. Viss samverkan förekommer med GIF.

Ryssland driver också sin egen utveckling av nya reaktorkonstruktioner. En utvecklingslinje är reaktorer med smält bly som kylmedel. Konstruktionen bygger delvis på erfarenheter från ryska ubåtsreaktorer.

Sammanfattningsvis kan konstateras att åtskilliga länder är aktivt engagerade i och samverkar kring utveckling av nya typer av fissionsreaktorer. De studier som pågår skall redovisa resultat under de

Fusionsreaktorer om femtio år?

Elproduktion med hjälp av fusion bygger på sammansmältning av vätekärnor till heliumkärnor. Det är i princip likartade processer som frigör energi i solens inre. På jorden räknar man i första hand med att använda kärnor av tungt och tretungt väte (deuterium och tritium). Energiråvaran för sådan deuterium-tritium-fusion förväntas räcka många tusen år framåt och har ingen alternativ användning.

Konsekvenserna av även mycket svåra reaktorhaverier blir mycket små eftersom reaktorn vid varje tidpunkt innehåller små mängder av radioaktiva ämnen. Inga radioaktiva klyvningsprodukter bildas ju i fusionsprocessen. Däremot sker viss aktivering av materialen i reaktorn. Det rör sig dock om måttliga mängder som klingar av på något hundratal år. Det radioaktiva avfallet innebär därför inget stort eller långsiktigt problem.

Man har forskat på fusionsreaktorer sedan 1950-talet. De grund-

läggande fysikaliska problemen visade sig dock ta mycket längre tid att lösa än man då trodde. I dag har man visat både teoretiskt och experimentellt att man behärskar den grundläggande fysik som behövs för att bygga en fusionsreaktor. I det sameuropeiska projektet JET i Culham i Storbritannien har man nått en pulseffekt från fusion på 16 MW och lyckats hålla en effekt på ca 4 MW i flera sekunder.

Men det blir stora och tekniskt mycket komplicerade anläggningar. Därför bedömer man att det behövs ca 40 års ytterligare teknikutveckling med erfarenheter från prototypanläggningar innan vi slutgiltigt vet om tekniskt och ekonomiskt gångbara fusionsreaktorer kan börja byggas i större omfattning. EU är för närvarande världsledande på området genom sitt gemensamt finansierade sk ramprogram för fusionsforskning.

närmaste åren. Då kommer det att finnas ett bättre underlag för bedömning av huruvida dessa nya reaktorkonstruktioner erbjuder väsentliga fördelar säkerhetsmässigt, miljömässigt och ekonomiskt jämfört med vidareutvecklingar av dagens beprövade lättvattenreaktorer.

Det kommer också att behövas åtskilliga drift-

års erfarenheter från prototypanläggningar innan nya konstruktioner kan få större kommersiellt genomslag. Detta motiverar att projekt som GIF arbetar i ett 20- till 30-årsperspektiv, vilket ju också för fram till den period då en stor del av de befintliga lättvattenreaktorerna bedöms nå slutet på sin tekniska livslängd.

Hantering av använt bränsle och avfall

Av de cirka 250 000 ton utbränt kärnbränsle som producerats globalt de senaste 40 åren har ungefär en tredjedel upparbetats. De övriga två tredjedelarna mellanlagras. Inget land har ännu ett slutförvar i drift.

Driften av en 1 GWe kärnkraftreaktor ger upphov till ca 30 ton använt kärnbränsle per år. IAEA uppskattar att världens civila kärnkraftverk årligen ger upphov till sammanlagt 10 000 ton använt kärnbränsle.

Inget använt bränsle eller högaktivt avfall från upparbetning har ännu förts till slutförvar. Finland, USA och Sverige har kommit längst i det tekniska utvecklingsarbetet och den stegvisa politiska beslutsprocess som behövs för att förverkliga ett sådant. I avvaktan på slutförvar mellanlagras det använda kärnbränslet vid kärnkraftverken eller i centrala mellanlager. Det högaktiva avfallet

från upparbetningen förglasas och mellanlagras.

Den totala volymen använt kärnbränsle från de svenska kärnkraftreaktorerna fram till 2010 beräknas till ca 10 000 m³. Därtill kommer omkring samma volym radioaktiva reaktordelar och annat, som kräver en likartad kvalificerad slutförvaring.

Oberoende av hur användningen av kärnkraft utvecklas i framtiden har vi alltså redan i dag i Sverige en betydande mängd använt kärnbränsle som måste slutförvaras på ett säkert sätt.

De svenska reaktorernas använda kärnbränsle transporteras i speciella, typgodkända behållare ombord på specialfartyget M/S Sigyn till central-lagret för använt kärnbränsle (CLAB) intill Oskarshamns kärnkraftverk. I CLAB tas bränslepatronerna ut ur transportbehållarna och placeras i stora underjordiska lagringsbassänger fyllda med vatten. Det använda kärnbränslet producerar mycket värme genom sönderfallet av de radioaktiva klyvningsprodukterna, och måste därför kylas.

Värmeproduktionen avtar med tiden i och med att radioaktiviteten klingar av, men bränslepatronerna måste svalna i CLAB under åtskilliga årtionden för att värmeutvecklingen i ett kommande slutförvar av den typ som planeras i Sverige inte skall bli för hög.

Det är ägarna av kärnkraftverken som har det fulla ansvaret för att det använda kärnbränslet slutförvaras på ett sätt som är godtagbart med hänsyn till säkerhet och strålskydd. Den metod för slutförvaring de valt att satsa på via sitt gemensamma bolag SKB är den så kallade KBS-3-metoden.

Enligt denna metod skall det använda bränslet inneslutas i kapslar med en innerdel av järn och ett hölje av koppar. Kapslarna skall placeras på ca 400–500 meters djup i en stabil del av det svenska urberget. Bergkroppen skall kännetecknas av låg

Hantering av låg- och medelaktivt driftavfall

En 1 GWe kärnkraftreaktor ger årligen upphov till något hundratals kubikmeter låg- och medelaktivt driftavfall: reningsfilter, skyddskläder, förbrukade verktyg och annat som uppstår under driften.

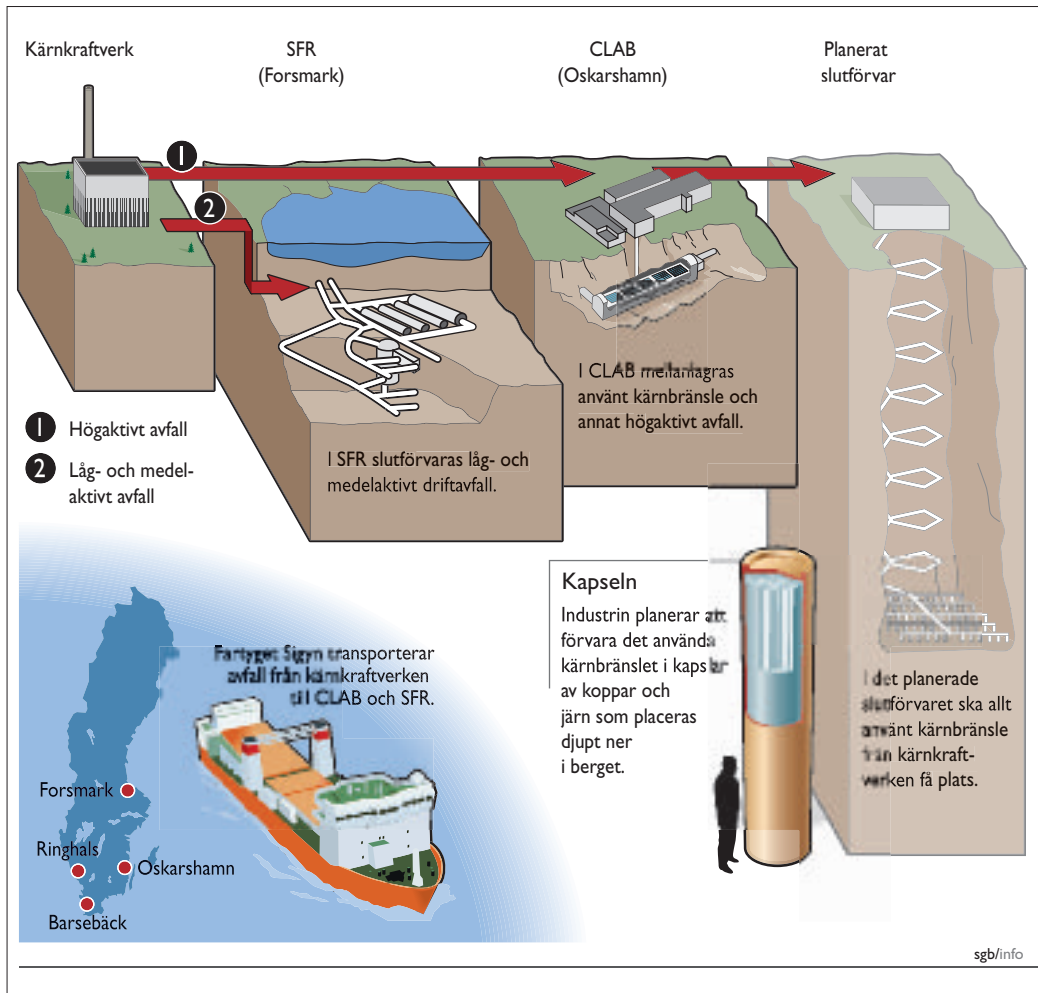
Den helt övervägande delen av de radioaktiva ämnena i driftavfallet klingar av på några hundra år, varefter mycket små mängder långlivade ämnen kvarstår.

Driftavfallet från de svenska reaktorerna placeras i slutförvaret för låg- och medelaktivt avfall, SFR, som varit i drift sedan 1988 och ligger intill Forsmarks kärnkraftverk. Avfallet placeras i stora berggrum, 60 meter under Östersjöns botten.

Så länge förvaret pumpas torrt läcker ingen radioaktivitet ut. När det förslutits kommer det att återfyllas med vatten. På lång sikt – tusen år eller mer – skulle SFR under pessimistiska antaganden möjligen kunna ge en risk för exponering av begränsade grupper vilken inte avviker från vad samhället i dag godtar för exponering från naturligt förekommande radioaktiva ämnen, t ex radon i brunnar, utan krav på särskilda åtgärder från samhällets sida.

Anläggningar för slutförvaring av låg- och medelaktivt driftavfall med liknande skyddsnivå som SFR finns i drift i flera andra länder, däribland Finland.

Befintliga och planerade anläggningar för att ta hand om använt kärnbränsle och kärnavfall. Källa: SKI och SKB.



vattengenomströmning och stabil vattenkemi med gynnsamma förhållanden för att undvika korrosion av kapslarnas kopparhöljen.

För att ytterligare skydda kapslarna skall de omges av ett tätande skikt av bentonitlera, som kraftigt bromsar flödet av grundvatten som passerar kapseln. Därmed bromsas eventuellt inflöde av korroderande ämnen som kan skada kopparhöljet. Likaså bromsas utflödet av vatten som kan föra med sig vattenlösliga radioaktiva ämnen om kapseln skadats.

Ett KBS-3-förvar konstrueras för att kunna tillslutas och överges. Samtidigt erbjuder det vissa möjligheter att återta kapslarna om kommande generationer av något skäl skulle vilja göra detta. Särskilt gäller detta innan tunnlar och schakt återfyllts, något som under alla

förhållanden ligger minst 60 år framåt i tiden.

Slutförvaring i stabila geologiska formationer av använt bränsle eller högaktivt avfall från upparbetning är också vad man i första hand satsar på i ett flertal andra kärnkraftländer med vissa variationer i utformningen, bl a beroende på lokala geologiska förhållanden. Finlands regering och riksdag har godkänt att en metod i huvudsak överensstämmande med KBS-3 får läggas till grund för konstruktion och byggande av ett slutförvar för använt kärnbränsle i Finland.

FINANSIERING AV SLUTFÖRVAR

Stora delar av kostnaderna för slutförvaring uppstår åtskilliga årtionden efter det att reaktordrif-

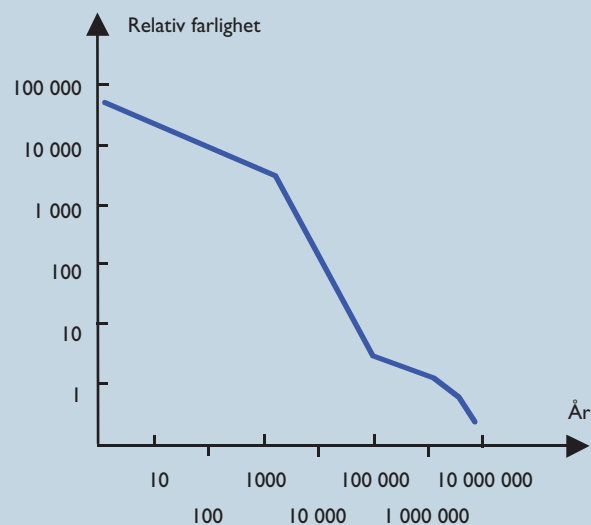
Säkerhetsanalyser

SKB publicerade 1999 en ingående säkerhetsanalys (SR 97) av ett slutförvar av typ KBS-3. Den har genomgått en särskild internationell expertgranskning, ledd av OECD/NEA, förutom det nationella remissförbandet och granskningen av tillsynsmyndigheterna SKI och SSI. Enligt SKB visar analyserna i SR 97 att SSIs strålskydds krav uppfylls även för mindre troliga framtida scenarier. Enligt SSIs krav skall ett svenskt slutförvar utformas så att årlig dos till en representativ individ i mest utsatt grupp under all framtid skall ligga under ca 0,02 mSv, dvs en femtiondel av den naturliga bakgrundsstrålningen

De doser som räknas fram kommer i första hand från långlivade klyvningsprodukter med hög löslighet i vatten. Dosbidragen från ämnen som uran och plutonium blir mycket låga, bl a eftersom dessa ämnen har låg löslighet i vatten under de förhållanden som kan förväntas råda i ett slutförvar av KBS-3-typ.

SKI och SSI bedömde båda efter sin granskning att SR 97 låg på en godtagbar nivå med hänsyn till de krav som kan ställas inför ett principbeslut om att även i fortsättningen ha KBS-3-metoden som planeringsförutsättning för arbetet på ett svensk slutförvar.

Ett grundläggande problem i riskbedömningarna är givetvis att bedöma trovärdigheten i de modeller som används för att beräkna inverkan av processer och fenomen i förvaret och omgivande berggrund i de mycket långa tidsperspektiv det är fråga om. Samtidigt som osäkerheterna i förutsägelseorna ökar med längden i tidsperspektivet, avtar det använda bränslets radiologiska farlighet genom det radioaktiva sönderfallet. Allt detta måste vägas in i bedömningar av riskerna.



Farlighet hos använt kärnbränsle i förhållande till det uran det framställts av.

ten och därmed intäkterna från elproduktionen upphört. Utifrån principen att den som producerar avfallet också skall stå för alla kostnader för att ta om hand och förvara det på ett säkert sätt, måste alltså pengar sättas av och förvaltas på ett sätt som säkerställer att de finns tillgängliga när kostnader som uppstår långt in i framtiden skall betalas.

I Sverige har kärnkraftföretagen och ytterst elkonsumenterna alltsedan början på 1980-talet betalat avgifter till statligt förvaltade fonder för att täcka utgifter för framtida hantering och förvaring av använt kärnbränsle, samt för att riva reaktorerna och ta hand om rivningsavfallet. Sammanlagt finns nu ca 26 miljarder kr i fonderade medel, vilket tillsammans med resterande inbetalningar och avkastningen på de fonderade medlen beräknas räcka för att täcka de framtida kostnaderna.

Flertalet länder med kärnkraft har infört olika typer av finansieringssystem med krav på avsättningar för framtida kostnader för hanteringen av använt bränsle och för att riva reaktorerna. Några länder har dock startat sent med avsättningarna, även om de drivit sina reaktorer i många år. Staten kan då få stå för betydande kostnader, särskilt när det gäller statsägda eller tidigare statsägda kärnkraftföretag.

INSYN OCH DELAKTIGHET

Det ställs mycket höga krav på insyn och delaktighet från allmänhetens sida i den stegvisa prövningsprocess som skall leda fram till slutliga val av teknisk lösning och plats för slutförvaret med tillhörande tillståndsprövning enligt olika lagar. En närmare diskussion av hithörande frågor faller dock utanför ramen för denna väsentligen tekniska och ekonomiska faktsammanställning.

REGERINGENS STÄLLNINGSTAGANDE

I ett beslut den 1 november 2001 bedömde regeringen att SKB bör använda KBS-3-metoden som planeringsförutsättning för de platsundersökningar som SKB står i begrepp att inleda.

Regeringen framhåller samtidigt att detta på intet sätt föregriper ställningstaganden till framtida tillståndsansökningar. SKB bör även fortsättningsvis inom ramen för forsknings-, utvecklings- och demonstrationsprogrammen bevaka teknikutvecklingen avseende olika alternativ för omhändertagande av kärnavfall.

Bakom regeringens beslut ligger en rad expertbedömningar, bl a från tillsynsmyndigheterna SKI och SSI, att så långt man nu kan bedöma är KBS-3-metoden den lämpligaste att fortsätta att satsa på för svenskt bruk. Detta är under förutsättning att man skall ha den grundläggande målsättningen att de generationer som dragit nytta av kärnkraften också skall ta det tekniska och ekonomiska

ansvaret för att det använda bränslet placeras i ett säkert och övergivet slutförvar.

Att bara »vänta och se« i förhoppning om att hitta bättre teknik och metoder innebär också risker eftersom man då förlitar sig på att samhällets tekniska och ekonomiska kapacitet och politiska stabilitet vidmakthålls i hundraårsperspektiv och kanske längre. Man inser att sådana långsiktiga bedömningar av samhällsutvecklingen också har sina osäkerheter om man betraktar den politiska utvecklingen i Europa de senaste hundra åren.

SKB arbetar nu vidare med teknikutveckling och platsundersökningar med omfattande provborrningar utifrån de planeringsförutsättningar som angavs i regeringsbeslutet.

Framtida kostnader för använt kärnbränsle och kärnavfall

Ansvarsfördelningen industri – myndigheter – regering vad gäller omhändertagandet av använt kärnbränsle och kärnavfall och finansieringen av kostnader härför regleras i lagen (1984:3) om kärnteknisk verksamhet (kärntekniklagen) samt lagen (1992:1537) om finansiering av framtida utgifter för använt kärnbränsle m m (finansieringslagen).

Enligt dessa lagar och tillhörande förordningar har kärnkraftföretagen det fulla tekniska och ekonomiska ansvaret för alla åtgärder som behövs för att ta om hand och säkert förvara använt kärnbränsle och högaktivt avfall från kärnkraftverken, inklusive rivning av anläggningarna.

Vart tredje år redovisar kraftföretagen via sitt gemensamma bolag SKB sitt program för hur detta skall ske. Programredovisningen genomgår ett omfattande remissförfarande som hålls samman av SKI. Resultatet av remissgranskningen överlämnar SKI tillsammans med sitt eget yttrande till regeringen. Regeringen tar på grundval av remissyttrandena ställning till om SKBs program uppfyller kraven enligt lagarna, dvs är ändamålsenligt. Regeringen kan i samband därmed ställa upp vissa villkor för programmets genomförande.

Med programmets tekniska innehåll som utgångspunkt lämnar SKB varje år till SKI in en beräkning av återstående kostnader för programmets genomförande. SKBs beräkningar granskas av SKI som föreslår regeringen vilka avgifter som skall tas ut av varje kärnkraftverk för att täcka framtida kostnader. Avgifterna, som utgår per producerad kWh, fastställs sedan av regeringen. För närvarande ligger avgifterna i genomsnitt något under 1 öre per kWh.

Avgiftsberäkningarna grundas på att varje reaktor skall betala sin del av kostnaderna under 25 års drift. Osäkerheter i kostnadsberäkningarna skall uppskattas och kraftföretagen skall ställa finansiella garantier härför enligt finansieringslagen.

Avgifterna som betalas in placeras i fonder som förvaltas av en särskild statlig myndighet, Kärnavfallsfondens styrelse. SKB får sedan ersättning ur fonderna för att bygga och driva de anläggningar som behövs för att ta om hand och säkert förvara använt kärnbränsle och högaktivt avfall från kärnkraftverken, inklusive rivning av anläggningarna, samt för erforderlig forskning och utveckling. Hittills har närmare 14 miljarder kr betalats ut i sådana ersättningar. Totalt räknar man med att hantering och förvaring kommer att kosta ytterligare ca 45 miljarder kr, dvs sammanlagt ca 60 miljarder kr fram till början av andra hälften av 2000-talet (räknat i 2001 års penningvärde). Fondernas behållning uppgår i dag (2002) till ca 26 miljarder kr. Tillsammans med återstående avgiftsinbetalningar och avkastningen på fonderade medel bedöms detta räcka för att betala de framtida kostnaderna.

Vissa återstående kostnader för att ta hand om gammalt forskningsavfall i Studsvik och för en framtida rivning av forskningsreaktorn betalas via en särskild fond, den s k Studsviksfonden, lagfäst av riksdagen. Även Studsviksfonden tillförs medel via en mindre avgift på producerad kärnkraft, 0,15 öre per kWh.

Källa: SKI, Kärnavfallsfondens styrelse.

Möjlig framtida teknikutveckling

Forskning och utveckling pågår på många håll i världen i syfte att minska mängden långlivat radioaktivt avfall. Bridreaktorer och s k acceleratordrivna system hör till de tekniska lösningar som studeras.

Om de långlivade radioaktiva ämnen kan minskas kraftigt kommer avfallet i slutet av kärnbränslecykeln att huvudsakligen bestå av högaktiva klyvningsprodukter med relativt korta halveringstider. De klingar av till mycket låga nivåer på 300–500 år. Därigenom minskar kraven på slutförvaren avsevärt för dessa avfallsprodukter, liksom risken för att kommande generationer långt in i framtiden kan utsättas för låga stråldoser.

Det handlar dels om att minska mängden plutonium och andra tunga atomkärnor, dels om att minska mängden långlivade klyvningsprodukter eftersom det visat sig att dessa kan komma att ge de dominerande bidragen till framtida stråldoser, bl a eftersom dessa ämnen kan bilda föreningar som är lätt lösliga i vatten.

Betydande mängder plutonium, ca 1 400 ton, finns i dag lagrat i olika länder. Det kommer dels från upparbetning av använt kärnbränsle, dels från skrotade kärnvapen. Det kan på goda grunder ifrågasättas om fortsatt lagring av detta plutonium i låt vara säkra och välövervakade lager kan anses vara en långsiktigt hållbar lösning från icke-spridningssynpunkt och om man ser till det ansvar som läggs på kommande generationer.

Plutonium kan förbrännas genom kärnklyvning i olika typer av s k bridreaktorer, kyllda med flytande metall (natrium, bly eller en blandning av vismut och bly). Tekniken finns utvecklad i flera länder, bl a Frankrike, Ryssland, Japan, Storbritannien och USA (se sid 25). Förbränning av plutonium i bridreaktorer löser dock inte alla problem förknippade med långlivade radioaktiva ämnen. Det har gjort att man under senare år allt

intensivare undersöker möjligheterna att hitta tekniska lösningar för att kraftigt minska halterna av alla typer av långlivade radioaktiva ämnen i det använda kärnbränslet.

En möjlig teknik är s k acceleratordrivna system (ADS). I ett sådant system låter man en kraftig stråle av vätekärnor (protoner) från en partikelaccelerator träffa ett s k target, typiskt i form av en bly- eller bly-vismutmälta, i ett reaktorkärl som i mycket påminner om en bridreaktor. I reaktorkärllet finns dels klyvbart material som uran, torium och plutonium, dels de långlivade radioaktiva ämnen som man vill förbränna.

När protonstrålen från acceleratorn träffar de tunga metallatomerna i targetsmältan bildas ett mycket intensivt neutronflöde som passerar ut i själva reaktorhärden. I detta intensiva neutronflöde klyvs uran- och plutoniumatomer vilket ger energi och än fler neutroner. Vidare förvandlas (transmuteras) de långlivade ämnena till andra, mer kortlivade eller stabila ämnen. Bränslet skickas upprepade gånger genom en upparbetningsanläggning där de kortlivade och stabila ämnena avskiljs medan de långlivade ämnena återförs till reaktorhärden för fortsatt förbränning.

Med i dag industriellt tillgänglig teknik räknar man med att den radiologiska farligheten förknippad med långlivade ämnen i använt bränsle från lättvattenreaktorer kan minskas cirka 100 gånger. Med ytterligare utvecklad teknik skulle den förmodligen kunna minskas ca 1 000 gånger, kanske mer.

Reaktorhärden i ett acceleratordrivet system är så utformad att den är underkritisk, dvs kärnklyvningen kan inte fortgå utan protonstrålen från acceleratorn. När denna stängs av stannar kärnklyvningen. I princip blir det då omöjligt med olyckor till följd av skenande kedjereaktioner som

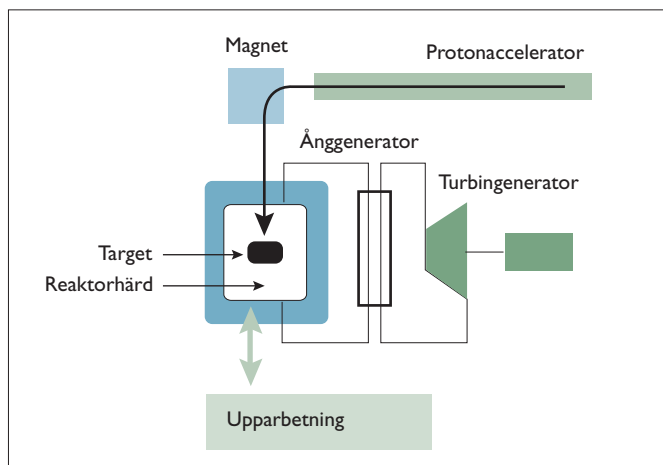
i Tjernobyli. I praktiken kan man dock komma att behöva lägga sig nära kriticitet för att få tekniskt och ekonomiskt rimliga storlekar på acceleratoren. Vid en teknisk och ekonomisk optimering av en ADS-konstruktion måste därför behovet av olika säkerhetssystem analyseras noggrant så att man säkerställer att man i alla driftlägen och störfall har tillräckliga marginaler till kriticitet.

En anläggning av ADS-typ för förbränning av plutonium och långlivade radioaktiva avfallsprodukter består sålunda av en kraftfull partikelaccelerator, ett target för generering av neutroner, en reaktorhård med smält metall som kylmedel och en upparbetningsanläggning samt en inkapslingsanläggning för de högaktiva men mer kortlivade avfallsprodukterna. Totalt rör det sig alltså om en förhållandevis tekniskt komplicerad och därmed dyr anläggning.

ADS-metodens förespråkare har grovt uppskattat investeringskostnaderna för en anläggning med en elektrisk nettoeffekt på ca 700 MWe till ca 30 miljarder kronor, dvs dubbelt så hög investeringskostnad per installerad MWe som en modern lättvattenreaktor. Därtill kan man förvänta sig väsentligt högre rivningskostnader på grund av hög kvarvarande radioaktivitet i stora delar av anläggningen. Visserligen kommer anläggningen att producera energi men som vid andra kärnkraftanläggningar domineras kostnaderna per kWh av kapitalkostnaderna.

För att få bättre total systemekonomi med balans i materialflödena så att lika stora mängder långlivade ämnen förbränns som produceras tänker man sig därför att en ADS-anläggning skall kombineras med vanliga reaktorer och eventuellt bridreaktorer. Exempelvis skulle enligt franska studier en kombination av 15 lättvattenreaktorer, 2 bridreaktorer och 1 ADS-anläggning kunna ge sådan balans i flödena.

Transmutation i en ADS-anläggning skulle således kunna radikalt minska mängden långlivade radioaktiva ämnen, men inte eliminera dem helt. Vissa mängder långlivat avfall kommer ändå att uppstå i form av avfall från olika led i processen,



Principiell utformning av ett acceleratordrivet system (ADS) för transmutation av långlivade radioaktiva ämnen.

samt i form av avfall när anläggningarna rivs.

Dessa typer av avfall kommer att kräva kvalificerade geologiska djupförvar, men i mindre skala.

Många omgångar upparbetning ger driftutsläpp till omgivningen också av långlivade ämnen, även om utsläppen per upparbetningsomgång skulle kunna minska med ytterligare reningsteg. Användning av ADS-teknik skulle således kunna innebära att man byter minskade potentiella risker långt in i framtiden mot ökade faktiska driftutsläpp i nutid.

Sammanfattningsvis återstår mycket av forskning, teknisk utveckling och inte minst tekniska, ekonomiska och miljömässiga livscykelanalyser för att få ett bättre underlag för att bedöma ADS-teknikens möjligheter och begränsningar. Betydande resurser satsas också i dag på sådan forskning och utveckling, inte minst för att tekniken är en av flera intressanta möjligheter att ta hand om de stora mängder plutonium som redan finns lagrade. I Europa siktar man på att bygga en mindre 100 MW transmutationsanläggning inom 20 år och erfarenheter från denna planeras sedan ligga till grund för en fullskalig demonstrationsanläggning som beräknas kunna ge drift erfarenheter om ytterligare 20 år.

Källor och referenser

Kärnkraft i 31 länder

OECD/NEA
IEA
IAEA
EU-kommissionen

Kärnkraftens ekonomi

OECD/NEA
SOU 1995:139
Finska Handels- och Industriministeriets underlagspromemoria till finska statsrådets principbeslut att tillstyrka byggandet av en femte reaktor i Finland

Användning på 10-20 års sikt

EU-kommissionens »Grönbok« (COM(2000) 769 final)
Nationella redovisningar vid IAEA:s generalkonferenser
USNRC:s hemsida
US DOE:s hemsida

Effekter på hälsa och miljö

KVA (Akademien anser nr1/2002)
SSI:s hemsida
Radiological Impact of Spent Fuel Management Options – A comparative study
OECD/NEA, Paris, 2000
Säkerhets- och strålskyddsläget vid de svenska kärnkraftverken 2001
SKI Rapport 02:14
SSI-rapport 2002:07
1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection
ICRP Publication No. 60 (1991)
Uttalande antaget vid OSPAR-kommissionens ministermöte i juli 1998
SSI: Strålskyddsnytt nr 2, 2002
Certified Environmental Product Declarations of Electricity from Forsmarks Kraftgrupp AB and Ringhals AB

Olycksrisker och säkerhetsarbete

SKI: Nucleus nr 3-4/1999
M. De Cort, G. Dubois, Sh. D. Fridman, M.G. Germenchuk, Yu. A. Izrael, A. Janssens, A. R. Jones, G. N. Kelly, E. V. Kvasnikova, I. I. Matveenko, I. M. Nazarov, Yu. M. Pokumeiko, V.A. Sitak, E. D. Stukin, L. Ya. Tabachny, Yu. S. Tsaturov and S.I. Avdyushin, »Atlas of Caesium Deposition on Europe after the Chernobyl Accident«, EUR report nr. 16733, EC, Official Publications of the European Communities, Luxembourg (1998).
The Human Consequences of the Chernobyl Nuclear Accident, A Strategy for Recovery. A Report Commissioned by UNDP and UNICEF with the support of UN-OCHA and WHO
UNDP, Januari 2002

Tillgång till klyvbart material

OECD/NEA och IAEA

Tillgång till teknisk och industriell kompetens

SKI Rapport 02:24: SKIs forskningsstrategi

Reaktorteknisk utveckling

European Utility Requirements for LWR Nuclear Power Plants
Revision B - C, 2000-2001
IAEA

Hantering av använt bränsle och avfall

Regeringsbeslut den 1 november 2001 med tillhörande underlagsrapporter från SKI och SSI
Proceedings from the IVA conference on ADS in 1997 (IVA 1998)
Opinion of the Euratom Scientific and Technical Committee on a Nuclear Energy Amplifier (Rapport EUR 17616, 1997)
Overview of the EU research projects on partitioning and transmutation of long-lived radionuclides (Rapport EUR 19614, 2000)

Kommentarer

Sven Kullander:

Faktasamlingen om Kärnkraften i dag och i morgon är en utmärkt sammanställning som på ett klart och nyanserat sätt innehåller tekniska, miljöpåverkande, ekonomiska och politiska aspekter på kärnkraften. Författaren har genom sin mångåriga verksamhet, främst med kärnsäkerhetsfrågor, förvärvat ett imponerande kunnande inom området.

Kärnkraften är vid sidan av fossilkraften bas för elproduktionen i flera länder och kan i framtiden komma att spela en större roll för energiförsörjningen i och med att växthuseffekten och sinande oljetillgångar blir allt mer påtagliga. För en utbyggnad av kärnkraften är som påpekas endast färdiga reaktorkonstruktioner av intresse när det gäller det närmaste decenniet. Uranbränslet kan förväntas räcka i 250 år om energiutvinningen baseras på isotopen uran-235. På längre sikt kan kärnkraften komma att bli ett verkligt uthålligt alternativ om både uran-238 och torium-232 utnyttjas som bränsle med bridreakorteknik. Tidsperspektiven blir då i stället för 250 år flera tiotusentals år. Med bridreaktorer finns också möjlighet att reducera mängden avfallsplutonium. Det är angeläget att Sverige med ett väl utvecklat kunnande inom kärnkraftsområdet också följer och deltar i utvecklingen och forskningen om bridreaktorer. I dag är detta inte politiskt möjligt men läget inom energiområdet kan snabbt komma att förändras så en viss beredskap bör finnas.

Relativt stort utrymme har givits åt kärnkraftens miljöpåverkan som är väl kända tack vare de sofistikerade mätmetoder som finns utvecklade för strålningen från radioaktiva substanser. I jämförelse med andra energislag är kärnkraftens verkan på hälsa och miljö dock liten vilket har visats i olika livscykelanalyser exempelvis i ExternE och i studier som gjorts inom Stockholm Environment

Institute (SEI). Detta faktum bör hållas i minnet i det fortsatta arbetet inom Energiframsynen. Sambanden mellan energi, hälsa och miljö för olika energislag har nyligen också belysts i Kungl. Vetenskapsakademiens inlägg i debatten (Akademien anser nr 1/2002).

Särskild uppmärksamhet bör ägnas plutonium. Dess hälso- och miljöpåverkan sammanhänger med att det är radioaktivt men dess kemiska effekter är jämförelsevis små. Eftersom halveringstiden är 24 000 år kommer plutoniets radioaktivitet att vara en väsentlig del av avfallets radiotoxicitet under lång tid. Relativt säkra lager har utvecklats för det radioaktiva avfallet speciellt i Sverige och det är svårt att se hur allvarliga läckage skulle kunna inträffa. Det problem som framför allt måste uppmärksammas är att plutonium inte kommer på avvägar och till användning för vapenproduktion. Kopplingen till kärnvapenframställning har dock blivit mindre genom att uran-235 kan framställas och utnyttjas för kärnvapen utan användning av kärnkraftreaktorer för civilt bruk. Så oberoende av den civila kärnkraften är kärnvapenframställning en global säkerhetspolitisk fråga. I sammanhanget bör nämnas att resurser satsas så att Sverige kan delta i forskningen och utvecklingen av acceleratordrivna transmutionsanläggningar för destruktion av långlivat avfall, däribland plutonium. Målsättningen för Europas del är att ha en mindre fungerande prototyp inom 20 år och en fullskalanläggning om 40 år. Sverige är redan med i denna forskning men det är ändå angeläget att lagen om kärnteknisk verksamhet som förbjuder arbeten syftande till en kärnkraftsreaktor i Sverige avskaffas. En anläggning för destruktion av radioaktivt avfall skulle därmed kunna byggas i Sverige.

Tomas Käberger:

Faktarapporten ger en bra bild av kärnenergens ställning: Framtida reaktorer måste göras billigare för att klara konkurrensen med nya förnybara energikällor. Bränslesystem som bättre tar tillvara energin är samtidigt viktiga om kärnenergi skall få stor betydelse på lång sikt.

För Energiframsyn är säkerhetspolitiska aspekterna relevanta. Kärnreaktorer för elproduktion medför inte bara klyvbart material utan också kompetens och utrustning användbara för massförstörelsevapen – både bomber och radiologiska vapen. Samhällig skada uppstår redan då risken motiverar otrevliga säkerhetssystem.

Framtiden påverkas av verkligheten bakom dagens osäkra kvantifieringar av riskerna med joniserande strålning och radioaktiva föroreningar. Skademekanismerna är dåligt kända, samtidigt som det har funnits få tillfällen till epidemiologiska studier av effekter, särskilt vad gäller olika radioaktiva föroreningar.

För kärnteknisk verksamhet är genetiska skador på människor en betydande ekonomisk risk. Antalet personer som kan komma att kräva ekonomisk ersättning för sådana skador är stort. Publicerade studier om genetiska effekter av Tjernobylihavariet respektive sovjetiska kärnvapenprov [Dubrova et al. 1996, Dubrova et al. 2002], liksom iakttagelser av oväntat många fall av blodcancer bland barn kring uppberedningsanläggningar för radioaktivt avfall [Gardner et al. 1990, Guizard, et al. 2001] väcker därför stor uppmärksamhet inom kärnteknisk industri. Det senare särskilt då barnens sjukdom uppvisar samband med den strålning fäderna utsatts för i sådan industri

innan barnen avlats [Dickinson & Parker, 2002].

Flera av dessa resultat har offentligt kritiserats som svagt grundade, orsakade av slumpen eller virus. Men privata kapitalägare har de senaste åren garderat sig mot framtida ekonomiskt ansvar för radioaktivt material och dess skadeverkningar. De tidigare privata bolag som levererat reaktorer i Sverige är t ex numera i statlig ägo och det ekonomiska ansvaret därmed hos de brittiska skattebetalarna. För dem är det nu viktigt vad som är sant om riskerna.

Referenser

- Gardner, M. et al. 1990: Results of case-control study of leukaemia and lymphoma among young people near Sellafield nuclear plant in West Cumbria. *British Medical Journal*, Vol. 300 pp. 423-434.
- Guizard, A-V, et al. 2001: The incidence of childhood leukaemia around the La Hague nuclear waste reprocessing plant (France): a survey for the years 1978-1998. *Journal of Epidemiological Community Health*, vol. 55 pp. 469-474.
- Dickinson, H.O. & Parker, L. 2002: Leukemia and non-hodgkin's lymphoma in children of male Sellafield radiation workers. *International Journal of Cancer*, vol. 99 pp. 437-444.
- Dubrova, Y.E. et al. 1996: Human minisatellite mutation rate after the Chernobyl accident. *Nature* vol. 380, pp. 683-686.
- Dubrova, Y.E. et al. 2002: Nuclear weapons tests and human germline mutation rate. *Science* vol. 295, p 1037.

Kärnkraft i dag och i morgon

Denna faktasammanställning har gjorts relativt detaljerad, eftersom kärnkraft väcker många komplicerade frågor kring t ex ekonomi, olycksrisker samt hantering och förvaring av radioaktivt avfall.

Vid normal drift ger stråldoserna från ett kärnkraftverk ett mycket litet tillskott till den individuella risken för cancer, men om ett reaktorhaveri medför utsläpp till omgivningen kan de psykosociala följderna bli mycket svåra eftersom stora områden kan behöva utrymmas under lång tid.

Ett grundläggande problem vad gäller förvaret av kärnkraftens avfall är att bedöma trovärdigheten i de modeller, som beräknar inverkan av olika processer i de mycket långa tidsperspektiv det är fråga om. En möjlig, men kostsam teknik att minska (men inte eliminera) mängden långlivat radioaktivt avfall är s.k. acceleratordrivna system (ADS).

Inom EU beräknas el från kärnkraft minska med 50 procent fram till 2030. Detta som en följd av medlemsländernas energipolitik och av att de befintliga kärnkraftverken når slutet av sin livslängd. Under samma tidsperiod kommer även ett stort antal fossileldade kraftverk att ha tjänat ut, samtidigt som elanvändningen förväntas öka. Hanteringen av dessa två trender kommer att utgöra en nyckelfråga för kärnkraften.

De reaktorkonstruktioner, som kan beställas idag, är vidareutvecklade vad gäller både ekonomi och säkerhet. På längre sikt kan helt nya reaktortyper (t.ex. gas- eller metallsmältskylda och med nya bränslecykler) vara framtagna för kommersiellt bruk.

Energiframsyn Sverige i Europa

Kungliga Ingenjörsvetenskapsakademien, IVA, är en oberoende arena för kunskapsutbyte. Genom att initiera och stimulera kontakter mellan olika kompetensområden och över nationsgränser fungerar akademien som gränsöverskridande brobyggare mellan näringsliv, forskning, förvaltning och olika intressegrupper.

IVA-projektet »Energiframsyn Sverige i Europa« belyser det svenska energisystemet ur framför allt ett europeiskt men även ett globalt perspektiv. Det europeiska är viktigt mot bakgrund av pågående avregleringar och genom att el- och gasnät knyts samman i allt större regioner. Klimatfrågan motiverar ett globalt perspektiv.

Genom att blicka framåt i tiden vill IVA stimulera till intressanta och balanserade diskussioner genom att ge nya insikter och tankeväckande men trovärdiga och realistiska framtidsbilder av det svenska energisystemet som en del av Europas.

Energiframsyn vänder sig till beslutsfattare inom förvaltning, näringsliv och forskning men också till en vidare krets av personer, som arbetar med eller intresserar sig för energifrågor.

I detta arbete har en skriftserie om ett antal populärt hållna rapporter med dagens fakta och med en bedömning av utvecklingen i ett 20-årsperspektiv tagits fram för att ge underlag till Energiframsyns framtidsbilder. Denna skrift ingår i serien Energiframsyns Faktarapporter.

